REVUE BROWN BOVERI



Train-Minirail à conduite automatique, à l'Exposition mondiale de Montréal, Canada

REV. BROWN BOVERI TOME 56 N° 3 PAGES 109 à 160 BADEN, MARS 1969

Imprimé en Suisse

# REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & CIE, BADEN (SUISSE)

Tome 56 Mars 1969 N° 3

SOMMAIRE

Influence de liaisons à courant continu à haute tension sur la stabilité des réseaux triphasés

621.3.016.35:621.315.051.024

En raison des excellentes propriétés qu'elle présente en ce qui concerne ses possibilités de régulation, une liaison à courant continu à haute tension insérée dans un réseau triphasé permet d'en améliorer la stabilité. A cet effet, il suffit de faire intervenir dans le dispositif de régulation de cette liaison des influences appropriées dérivées de certaines grandeurs caractérisant le fonctionnement du réseau. Les auteurs, J. Käuferle et E. Pröll, rendent compte des résultats d'une étude faite à ce sujet dans le cadre du programme d'activité d'un groupe formé par les sociétés AEG-Telefunken, Brown Boveri et Siemens pour l'étude en commun des liaisons à courant continu à haute tension.

Exposé du problème

L'insertion d'une liaison à courant continu à haute tension dans un réseau ne peut se justifier que par des avantages économiques. C'est pourquoi ce genre de liaisons a été utilisé jusqu'ici presque exclusivement pour le transport d'énergie électrique à de grandes distances ou encore pour les longues lignes constituées par des câbles sous-marins, par exemple pour relier une centrale éloignée à un réseau de distribution ou pour l'interconnexion de deux réseaux. Dans de tels cas, il est relativement aisé de faire apparaître les avantages économiques parce que, à partir d'une certaine distance (600 à 800 km pour les lignes aériennes et 20 à 30 km pour les câbles sous-marins), l'économie réalisée sur le coût de la ligne qui est inférieur à celui d'une liaison à courant triphasé compense et surpasse même le coût plus élevé des postes terminaux. En raison de la grande souplesse avec laquelle elles se prêtent à la régulation, les liaisons à courant continu présentent également des avantages lorsqu'elles constituent une partie intégrante d'un réseau triphasé. En ce qui concerne l'aspect économique, il faut alors tenir compte de nouveaux points de vue dont l'influence peut difficilement être évaluée. Des projets sont déjà en cours d'exécution dans lesquels les barres omnibus à courant triphasé des deux postes d'extrémité de la ligne à courant continu sont reliées également par des lignes à courant triphasé.

Dans les grands réseaux maillés et interconnectés, le fait de pouvoir rester maître des flux d'énergie circulant en régime normal et lors d'une perturbation joue un rôle important. Le système de régulation fréquence–puissance représente un excellent moyen de résoudre les problèmes de régulation de réseaux triphasés interconnectés [1]. Il semble cependant, dans certains cas, que l'on atteigne des situations limites qui rendront souhaitables, à l'avenir, l'implantation de lignes de transport pouvant être soumises à une régulation pratiquement sans inertie et indépendante des conditions existant à leurs extrémités. Les lignes à courant continu offrent la possibilité d'influencer favorablement, en régime normal, les flux d'énergie active et réactive et même de leur donner des valeurs optimales. De plus, comme elles ne fournissent aucune contribution à la puissance de court-circuit en jeu aux points où elles sont raccordées aux réseaux, les flux d'énergie circulant à l'apparition de courts-circuits dans le réseau peuvent être maîtrisés plus facilement. La rapidité avec laquelle les lignes à courant continu peuvent agir sur le flux d'énergie permet en outre d'influencer les oscillations de puissance liées aux oscillations pendulaires qui peuvent survenir après une perturbation ou même en service normal, de manière à améliorer la stabilité du réseau. C'est cette influence des liaisons à courant continu sur la stabilité des réseaux triphasés qui fait l'objet de la présente étude.

La plupart des cas où la stabilité d'un ensemble de réseaux interconnectés est en péril se présentent lorsque certains de ces réseaux sont reliés par des lignes triphasés de longueur relativement grande ou de faible puissance nominale. Le danger est encore plus grand lorsque l'ensemble des masses des rotors des machines présentes dans l'un des réseaux est relativement faible en regard de la puissance transmise par la ligne d'interconnexion. On se trouve en face de problèmes semblables lorsqu'une certaine puissance est transmise de manière asynchrone par une ligne à courant continu à une partie de réseau dans laquelle la production d'énergie est faible et qui est elle-même reliée à un réseau puissant par une ligne à courant triphasé. Dans tous les cas, la ou les lignes d'interconnexion à courant triphasé peuvent être le siège d'oscillations électriques auxquelles sont liées des oscillations pendulaires des machines des réseaux, oscillations pouvant, dans certaines circonstances, provoquer des pertes de synchronisme. Si deux réseaux sont reliés exclusivement par une ligne à courant continu, il n'existe aucun couplage entre les génératrices des deux réseaux en raison du

caractère asynchrone de la liaison et les oscillations dont il est question ci-dessus ne peuvent se produire. Quant à la question de la stabilité propre des liaisons à courant continu, elle sort du cadre de la présente étude. Comme la puissance transmise par une ligne à courant continu peut être facilement réglée, on peut se demander s'il ne serait pas possible d'utiliser cette propriété pour appliquer des mesures pouvant contribuer à l'amélioration de la stabilité. Diverses propositions ont été faites à ce sujet (voir [2] à [5]). Les plus importantes ont été étudiées par E. Uhlmann [4] qui s'est fondé sur des considérations théoriques et sur l'emploi de fonctions de transfert simplifiées. Il faut remarquer toutefois que les liaisons à courant continu ne sont pas complètement indépendantes des conditions régnant à leurs extrémités, et en particulier des tensions. C'est pourquoi il est nécessaire, pour une étude exacte, de tenir compte aussi des grandeurs caractérisant le fonctionnement des réseaux triphasés aux points de connexion de la ligne à courant continu.

Nous nous sommes servis pour notre étude d'un système équivalent qui permettait d'examiner une grande partie des problèmes auxquels nous avons fait allusion sans que l'appareillage de simulation nécessaire ne devienne trop considérable. Un réseau équivalent I (fig. 1), comprenant une génératrice et des charges passives, alimente un réseau IV, supposé de puissance infinie, par l'intermédiaire d'une ligne triphasée II et d'une ligne à courant continu III branchées en parallèle. Notre étude avait pour but de déterminer dans divers cas de répartition stationnaire de la puissance, l'influence que pouvait avoir la ligne à courant continu sur les oscillations apparaissant entre les deux réseaux. Le centre de nos préoccupations consistait dans l'examen du comportement de l'ensemble du système, d'une part, lors de brusques changements de l'état du réseau provoqués par des manœuvres (stabilité statique), d'autre part lors de l'apparition de courts-circuits sur la ligne triphasée (stabilité dynamique).

Système équivalent et méthode d'investigation

Le réseau I du système (fig. 1) comprenait une centrale simulée (turbo-alternateur avec transformateur, puissance nominale 1170 MW) ayant les caractéristiques d'un groupe turbo-alternateur usuel de puissance comprise entre 200 et 300 MW et des consommateurs passifs d'énergie active et réactive qui avaient notamment pour fonction de compenser plus ou moins complètement la puissance réactive de caractère inductif du poste de conversion de la ligne à courant continu. Pour régler la tension de l'alternateur, on pouvait utiliser, au choix, un système d'excitation classique ou un système à redresseurs, de sorte que les résultats obtenus étaient valables aussi bien pour le cas où la centrale alimentait un réseau éloigné que pour le cas où elle serait remplacée par un réseau étendu dont la fréquence et la tension varieraient à peu près comme celles d'un turboalternateur avec régulation usuelle. La ligne triphasée avait une longueur de 500 km et sa tension était de 420 kV; sa puissance naturelle s'élevait à 585 MW. La tension nominale de la ligne à courant continu en parallèle était de 400 kV et son pouvoir nominal de transmission était également de 585 MW de sorte qu'elle pouvait être remplacée par une seconde ligne triphasée. Les postes de conversion de la ligne à courant continu étaient équipés de régulateurs à actions combinées proportionnelle et par intégration et l'ensemble de la liaison à courant continu était réglé suivant le procédé du courant marginal [6] avec maintien du courant constant (il était possible de superposer, à volonté, à ce système un réglage de puissance). Les valeurs optimales des paramètres de régulation et des caractéristiques de la liaison à courant continu ont été déterminées par le groupe formé par les sociétés AEG-Telefunken, Brown Boveri et Siemens pour l'étude en commun des liaisons à courant continu à haute tension, en collaboration avec le groupe de recherche de la «400-kV-Forschungsgemeinschaft», après d'importants essais effectués à l'aide du modèle de réseau de Rheinau (près de Heidelberg, Allemagne fédérale) et sur la base de considérations théoriques. Elles ont donc pu être reprises sans changements.

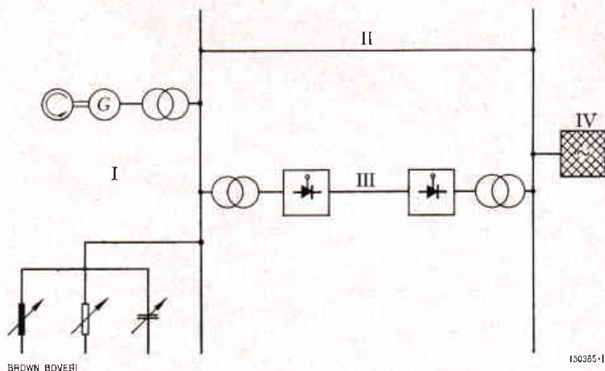


Fig. 1. – Système équivalent ayant servi à l'étude

I: Réseau équivalent comprenant une génératrice et des charges passives
II: Ligne triphasée à 420 kV
III: Ligne à courant continu à 400 kV
IV: Réseau de puissance infinie

Nous avons utilisé, pour notre étude, une calculatrice analogique sur laquelle était simulé le système décrit. Ce mode de représentation a, sur les essais pratiques effectués sur un modèle de réseau, l'inconvénient d'exiger des simplifications nécessaires pour maintenir dans des limites raisonnables le matériel de simulation. Ainsi, la calculatrice utilisée ne permettait de représenter de manière approchée que les phénomènes à la fréquence fondamentale. Il a fallu renoncer à la représentation du mode de fonctionnement des soupapes dû à la commande des grilles et d'autres sources d'harmoniques. Mais l'expérience a montré que pour des études de stabilité dans lesquelles ce sont surtout les phénomènes électro-mécaniques de fréquence voisine de 1 Hz qui présentent de l'intérêt, la représentation détaillée de phénomènes plus rapides comme, dans notre cas, les phénomènes de commutation et de commande des soupapes n'est pas indispensable. Une comparaison avec les résultats de l'étude faite à l'aide du modèle de réseau de Rheinau [7] a confirmé ce que nous venons de dire. Le grand avantage d'une étude faite avec une calculatrice analogique consiste dans la possibilité de faire varier différents paramètres entre de larges limites, sans que cela entraîne une dépense supplémentaire et d'obtenir ainsi plus rapidement et à moins de frais une vue d'ensemble sur les phénomènes étudiés.

Pour l'affichage de la machine synchrone sur la calculatrice analogique, on s'est fondé sur la théorie des deux axes et sur les équations de Park qui ont été traitées souvent dans la littérature technique et notamment dans [8]. Dans les équations de tension relatives aux enroulements du stator, la composante statique de la tension induite et la chute de tension ohmique ont été négligées, comme il est usuel de le faire dans les études de la stabilité statique. En ce qui concerne la stabilité dynamique, cette simplification est également admissible pour autant que l'on s'intéresse principalement aux mouvements de la roue polaire de la machine synchrone et que l'on n'attache pas grande valeur à l'évolution exacte des grandeurs électriques internes de la machine. Les grandeurs relatives à la ligne triphasée ont été considérées comme quasi stationnaires et la ligne a été représentée par sa matrice des admittances; on a tenu compte des pertes dans le cuivre, mais non des pertes dues à d'autres effets comme l'effet de couronne.

Pour la simulation de la liaison à courant continu, celle-ci a été fortement simplifiée et l'on n'a pris en considération que ses propriétés relatives à l'onde fondamentale dans la première partie de la caractéristique de chute de tension, c'est-à-dire en ne tenant pas compte des commutations multiples. La figure 2 représente le schéma de simulation analogique et donne les équations correspondantes. Ce mode de représentation ne laisse absolument rien à désirer pour ce qui est de l'étude de la stabilité sta-

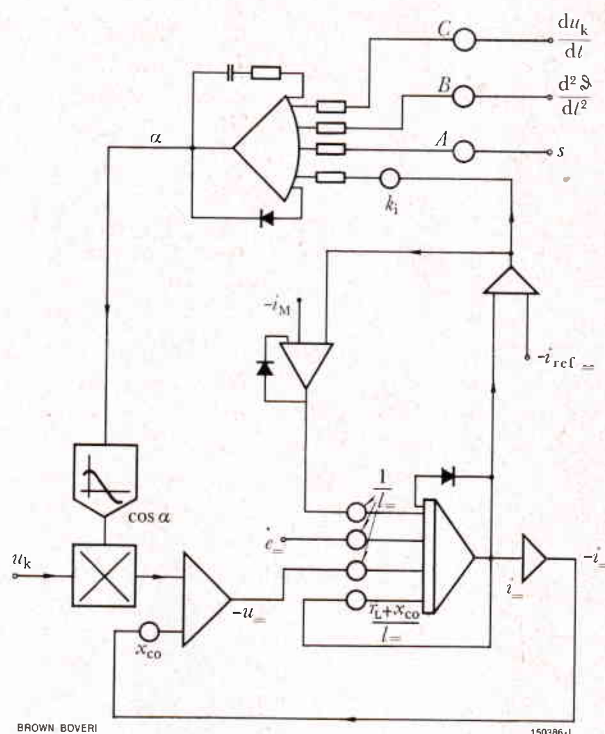


Fig. 2. – Schéma de simulation analogique de la liaison à courant continu et équations correspondantes

$$u_= = u_k \cdot \cos\alpha - i_= \cdot x_{co}$$

$$i_= = \frac{u_= - e_=}{\left(r_L + x_{co}\right)\left(1 + \dfrac{p \cdot l_=}{r_L + x_{co}}\right)}$$

$$\cos\Phi = \frac{u_=}{u_k}$$

A, B, C = facteurs d'amplification des signaux influençant la régulation
$e_=$ = force contre-électromotrice de l'onduleur
$i_=$ = valeur instantanée du courant continu
$i_{ref=}$ = valeur de consigne du courant continu
i_M = courant marginal
k_i = facteur d'amplification du circuit de régulation du courant continu
p = opérateur de Laplace
r_L = résistance de la ligne à courant continu rapportée à la puissance nominale
s = glissement de la génératrice par rapport au réseau IV
l = inductance du circuit à courant continu
$u_=$ = tension continue du poste redresseur
u_k = tension aux bornes de la génératrice
x_{co} = réactance de commutation d'un poste de conversion rapportée à la puissance nominale
α = angle de retard du poste de conversion
ϑ = angle de déphasage entre la force électromotrice de la génératrice et la tension du réseau IV
Φ = angle de déphasage du poste de conversion

tique. On ne peut en dire autant quant à l'étude de la stabilité dynamique, car il arrive que la tension alternative tombe assez fortement par moments. Mais une analyse des conditions qui se présentent a montré que l'erreur dont sont entachés les résultats est faible. La même remarque s'applique aussi au facteur de puissance ($\cos \varphi$) des postes de conversion dont le lien qui le rattache aux autres grandeurs est également représenté de manière approchée. Une méthode d'affichage semblable est utilisée dans l'étude faisant l'objet de la publication [9]. Le couplage électrique de la machine synchrone et du poste redresseur se fait par l'intermédiaire de la transformation indiquée sur la figure 3. Il a été possible, dans notre étude, de faire agir sur le réglage de courant de la ligne à courant continu l'influence de divers signaux avec des coefficients d'amplification variables, et notamment:

- le glissement de l'alternateur (différence entre les fréquences de la force électromotrice et de la tension du réseau IV) $s \triangleq d\vartheta/dt$,
- l'accélération de la masse en rotation $d^2\vartheta/dt^2$,
- la dérivée de la tension aux barres omnibus de l'alternateur du_k/dt.

Les études de la stabilité statique et de la stabilité dynamique ont été menées séparément. Pour la première, le système de transmission a été amené par des manœuvres provoquant des changements de l'état du système, à osciller de part et d'autre d'un état stationnaire et l'examen de l'amortissement des oscillations fournissait des indications sur la distance à laquelle se trouvait la limite de stabilité.

Nous avons adopté comme système de transmission de référence une ligne double à courant triphasé. Au cours de l'étude nous avons fait varier la puissance naturelle de la ligne triphasée, la puissance nominale de la liaison à courant continu et la charge passive supplémentaire alimentée par les barres de l'alternateur, mais en veillant à ce que la somme des charges actives correspondent toujours à la puissance active nominale de la génératrice. On a pu ainsi se faire une image de l'effet de changements de la répartition des puissances. Nous avons également examiné les conséquences qu'entraînaient les variations d'un autre paramètre important, à savoir le signal de stabilisation de la régulation du courant de la liaison à courant continu.

Pour l'étude de la stabilité dynamique, nous avons admis qu'un court-circuit affectant les trois phases de la ligne à courant alternatif représentait le défaut le plus grave. Le but principal de ces essais consistait à se rendre compte de l'influence de ce qui se passait du côté triphasé et à examiner l'efficacité des mesures appliquées à l'équipement de régulation de

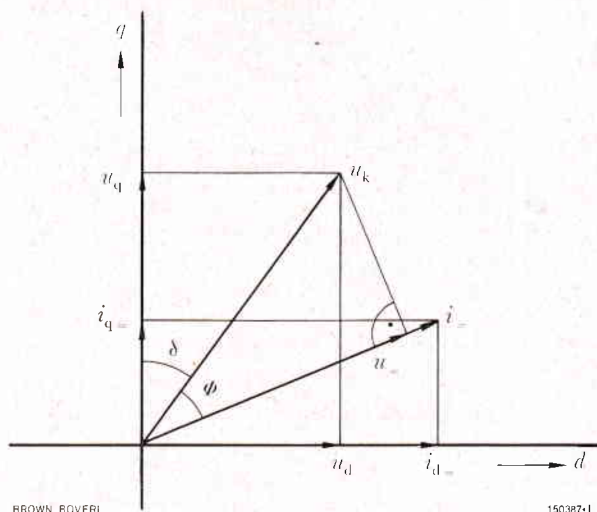


Fig. 3. – Transformation des grandeurs relatives à la ligne à courant continu pour les ramener aux axes de la machine synchrone

$\cos \Phi = \frac{u_=}{u_k}$ $\qquad$ $\cos \delta = \frac{u_q}{u_k}$

$i_{q=} = i_= \cdot \sin(\delta + \Phi)$

$i_{d=} = i_= \cdot \cos(\delta + \Phi)$

d = axe longitudinal de la génératrice
q = axe transversal de la génératrice
$i_=$ = valeur instantanée du courant continu
$i_{d=}$ = composante du courant continu ramenée à l'axe longitudinal de la génératrice
$i_{q=}$ = dito ramenée à l'axe transversal
$u_=$ = tension continue du poste redresseur
u_d = tension de la génératrice ramenée à l'axe longitudinal
u_k = tension aux bornes de la génératrice
u_q = tension de la génératrice ramenée à l'axe transversal
δ = déphasage entre la force électromotrice de la génératrice et la tension à ses bornes
Φ = angle de déphasage du poste de conversion

la liaison à courant continu en vue d'améliorer la stabilité de l'ensemble.

Stabilité statique

La stabilité statique d'un système de transmission est caractérisée par les oscillations prenant naissance dans ce système lors de manœuvres de service qui en modifient l'état de couplage. On peut observer deux cas où la limite de stabilité est atteinte. Dans l'un de ces cas, le facteur d'amortissement prend une valeur négative, et dans l'autre, le couple synchronisant est nul. Dans les deux cas, il y a perte de synchronisme. Le modèle mathématique exact représentant le système de transmission auquel nous avons affaire conduit à un système d'équations diffé-

rentielles d'ordre élevé [8]. Pour rendre la discussion des relations fondamentales plus claire (mais non pour l'étude), nous considérerons l'équation simplifiée du mouvement du rotor d'une machine synchrone non réglée, raccordée à un réseau de puissance infinie par l'intermédiaire d'une réactance.

Si nous désignons par s le glissement de la machine, par T_A sa constante d'accélération, par m_A le couple de la machine qui l'entraîne et par m_e le couple qui s'oppose à la rotation, on peut écrire

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_A}(m_A - m_e) \qquad (1)$$

Si le couple moteur et le courant d'excitation sont constants, on obtient, par transformation de cette équation et en admettant que les phénomènes sont linéaires, l'équation des petites oscillations de la machine de part et d'autre du point représentatif ϑ_0 de son fonctionnement

$$\frac{d^2\vartheta}{dt^2} + \underbrace{\frac{T_\vartheta}{T_A} \cdot \frac{d\vartheta}{dt}}_{\text{Couple d'amortissement}} + \underbrace{\frac{\omega_n}{T_A} \cdot \frac{e u_n}{X} \cdot \cos\vartheta_0 \cdot \vartheta}_{\text{Couple synchronisant}} = 0 \qquad (2)$$

Dans cette équation, l'angle ϑ désigne le déphasage entre la force électromotrice e de la machine et la tension u_n du réseau IV, T_ϑ le coefficient d'amortissement, ω_n la pulsation nominale et X la réactance totale comprise entre les bornes de l'alternateur synchrone et le réseau IV. Le deuxième terme représente le couple d'amortissement et le troisième, le couple synchronisant. Le mouvement de la roue polaire d'une machine synchrone de part et d'autre du point ϑ_0 ne dépend que des variations de la puissance active prélevée à ses bornes. L'équation simplifiée de ce mouvement montre que l'amortissement est provoqué par une puissance active proportionnelle au glissement et que le couple synchronisant est produit par une puissance active proportionnelle à l'angle de déphasage ϑ. Mais cette déduction n'est pas applicable sans une certaine réserve au système pratique auquel on a affaire parce que diverses grandeurs figurant dans l'équation ne restent pas constantes en raison de l'action du régulateur, et avant tout, dans le cas présent, du régulateur de tension. En outre, les consommateurs et lignes de transmission raccordés aux bornes de la machine exercent une influence sur la puissance active totale tirée de ces bornes, attendu que les charges absorbées par les uns et par les autres ne varient pas de la même manière en cas de fluctuations de tension et de fréquence. D'autre part, il est aussi possible, par action sur la régulation, de faire varier la puissance active transmise par la ligne à courant continu et cette influence peut être telle qu'elle améliore la stabilité statique de l'ensemble du système. Le but de notre étude était d'examiner l'effet que peut avoir sur cette stabilité une liaison à courant continu avec ou sans action de certaines grandeurs d'influence sur la régulation.

La puissance active produite par le modèle de génératrice restant toujours égale à sa valeur nominale, nous avons examiné comment varie le comportement de l'ensemble du système pour diverses répartitions de la puissance entre la ligne à courant continu avec équipement de régulation maintenant le courant constant, la ligne triphasée et les consommateurs passifs (fig. 4). Si, par un changement des caractéristiques, nous diminuons la puissance naturelle de la ligne triphasée, la différence de puissance étant alors reportée sur la ligne à courant continu, il en résultait une diminution de la fréquence des oscillations (réduction du couple synchronisant) tandis que l'amortissement n'était affecté que de peu. Si la transmission de puissance par la ligne à courant continu était interrompue et si la puissance correspondante était absorbée par des consommateurs passifs du réseau I, il en résultait une détériora-

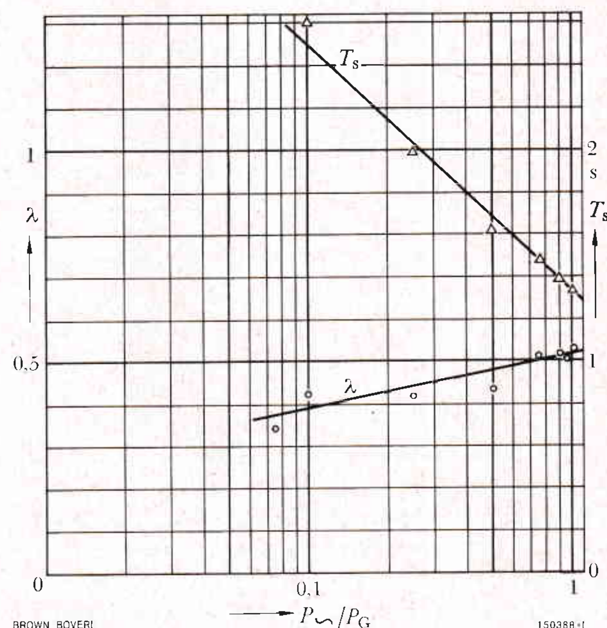


Fig. 4. – Diagramme relatif à la stabilité statique et illustrant le comportement du système lorsque le courant transmis par la ligne à courant continu est réglé de manière à rester constant, sans autre influence

$P_\sim$ = puissance naturelle de la ligne triphasée (correspond à la puissance active nominale)
P_G = puissance nominale de la génératrice
T_S = durée des oscillations transitoires
λ = décrément logarithmique des oscillations transitoires

tion de l'amortissement (cet effet n'est pas indiqué sur la figure 4). La réduction du couple synchronisant est due au changement apporté à la réactance de la ligne. Quant à la raison de la détérioration de l'amortissement, elle réside dans la différence existant entre les variations, en fonction de la tension, des puissances actives prises par la ligne à courant continu, d'une part, et par les consommateurs passifs, d'autre part. Dans le domaine des tensions qui nous intéresse, la puissance prise par la ligne à courant continu ne dépend pas en effet de la tension, tandis que celle qui est prise par les consommateurs passifs varie en fonction du carré de la tension. Par suite des oscillations de puissance active et de puissance réactive survenant sur la ligne triphasée en rapport avec les oscillations pendulaires de la machine, il apparaît, aux bornes de cette dernière, des fluctuations de tension qui influencent la puissance active prélevée. Ces interactions dépendent fortement, d'une part, de l'amplitude des fluctuations de tension, d'autre part, du déphasage existant entre ces fluctuations et les oscillations pendulaires. Celles-ci sont à leur tour influencées par le mode de régulation de la tension, par l'évolution des puissances réactives prélevées et par diverses autres composantes. Les fluctuations de puissance active qui, suivant leur phase, contiennent aussi bien des composantes proportionnelles au glissement que des composantes proportionnelles à l'angle de décalage et qui, par conséquent, influencent l'amortissement ainsi que, dans une certaine mesure, la fréquence des oscillations transitoires.

L'équation (2) montre que l'amortissement du système peut être amélioré par l'apparition, aux bornes de la génératrice d'une composante supplémentaire de charge active dépendant du glissement. Grâce à ses possibilités de régulation rapide, la ligne à courant continu permet de faire apparaître, par action sur son équipement de régulation, de telles variations transitoires de la charge active. A côté du glissement lui-même, il est possible de tirer des grandeurs en jeu dans le réseau (tension aux bornes de la génératrice, puissance transmise par la ligne triphasée, etc.) un grand nombre de signaux proportionnels au glissement qui se prêtent aussi bien à influencer la régulation de la ligne à courant continu. Notre étude a montré que de très bons résultats peuvent être atteints sous l'effet du glissement utilisé comme grandeur d'influence (fig. 5), même avec un faible degré d'amplification, ce degré devant alors varier de manière que l'amplitude des variations de la charge active dépendant du glissement et rapportées à la puissance nominale de la génératrice reste constante, indépendamment de la puissance nominale de la ligne à courant continu. Dans les essais, il a encore été possible, avec une ligne à courant continu de puissance nominale égale à 10 % seulement de la puissance nominale de la génératrice, d'obtenir une amélioration satisfaisante de l'amortissement. A titre de comparaison, des essais ont aussi été effectués avec utilisation de la dérivée de la tension aux bornes comme grandeur d'influence. La figure 6 permet de comparer les oscillations pendulaires relevées avec régulation sans autre influence, avec action du glissement sur la régulation et avec action de la dérivée de la tension. En raison de la présence d'une composante proportionnelle au glissement dans la fluctuation de la tension, il apparaît une composante proportionnelle à l'accélération qui agit sur la régulation et qui, si l'amplification est trop grande, peut de son côté avoir une influence défavorable sur l'amortissement.

La fréquence de l'oscillation transitoire peut aussi être facilement influencée si l'on fait varier en outre la puissance transmise par la ligne à courant continu à l'aide d'un signal proportionnel au décalage interne de la roue polaire (équation 2). La liaison à courant continu prend alors, sous ce rapport, le caractère d'une ligne à courant triphasé, mais avec un avantage: l'intensité de son influence ne dépend pas d'une grandeur en jeu dans le réseau (réactance de la ligne), mais uniquement de l'amplification du

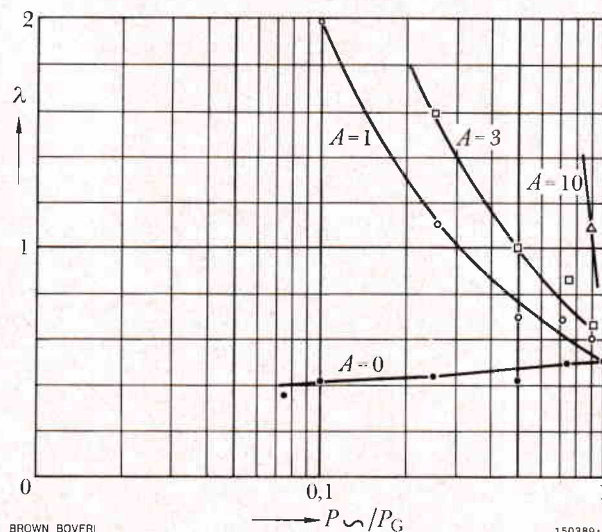


Fig. 5. – Diagramme relatif à la stabilité statique illustrant le comportement du système lorsque la régulation de la ligne à courant continu subit l'influence d'un signal dépendant du glissement

A = facteur d'amplification du signal d'influence
$P_{\sim}$ = puissance naturelle de la ligne triphasée (correspond à la puissance active nominale)
P_G = puissance nominale de la génératrice
λ = décrément logarithmique des oscillations transitoires

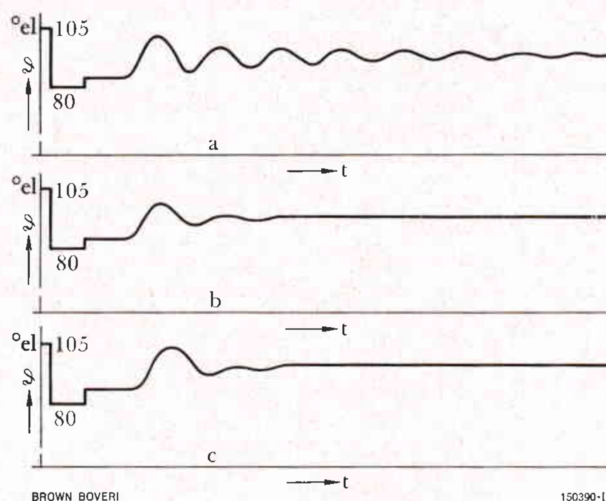


Fig. 6. – Stabilité statique

Relevés des oscillations pendulaires.
Ligne triphasée en parallèle avec ligne à c.c.:
- a: sans grandeur d'influence
- b: avec grandeur d'influence dépendant du glissement
- c: avec grandeur d'influence dépendant de du/dt

ϑ = angle de déphasage entre la force électromotrice de la génératrice et la tension du réseau IV

signal. En outre, on peut faire en sorte que l'effet de ce moyen ne s'exerce que sur le comportement transitoire de la ligne à courant continu dont les propriétés stationnaires restent alors inchangées.

Les résultats de notre étude sur la stabilité statique peuvent se résumer comme suit. Si la ligne à courant continu est réglée pour transmettre un courant constant ou une puissance constante, elle a une influence assez faible sur l'amortissement du système. Mais il est possible d'améliorer sensiblement la stabilité statique en faisant agir des grandeurs appropriées sur la régulation et en provoquant ainsi des variations transitoires relativement faibles de la puissance transmise par la ligne.

Stabilité dynamique

Si une perturbation survient dans la partie à courant triphasé du système et provoque une suppression ou une diminution de courte durée de la puissance active absorbée ou transmise, il en résulte une rupture de l'équilibre existant entre les puissances produite et prélevée et l'énergie en excès fournie au rotor de la machine doit être absorbée par ce rotor sous forme d'énergie cinétique. Il en résulte une accélération qui entraîne un agrandissement du décalage de la roue polaire, agrandissement qui peut conduire au décrochage de la machine si une certaine limite est dépassée. En ce qui concerne la stabilité dynamique, un important délestage de la génératrice représente donc la perturbation la plus désagréable. L'effet de ce délestage peut éventuellement être renforcé par l'influence de la perturbation sur la tension. La répartition de la puissance dans le régime établi avant l'apparition de la perturbation peut également avoir une influence sur les conséquences de cette perturbation. Dans notre étude, les situations critiques se sont présentées lorsque toute la puissance active produite par la génératrice était transmise par la ligne à courant continu et la ligne simple à courant triphasé couplées en parallèle ou par la ligne double à courant triphasé et que l'on produisait un court-circuit tripolaire sur la ligne triphasée, suivi de coupure de courte durée.

L'application de la refermeture automatique rapide pour la protection des lignes à haute tension est aujourd'hui usuelle. C'est pourquoi elle a été utilisée dans tous nos essais. Quant au cas encore plus défavorable du court-circuit tripolaire non suivi de refermeture automatique, il n'a pas été pris en considération. L'influence, sur la stabilité dynamique, de courts-circuits survenant sur la ligne à courant continu est beaucoup moins dangereuse en raison de l'élimination beaucoup plus rapide du défaut par les grilles des soupapes et de la valeur plus faible de la baisse de tension qui se produit dans la partie du système à courant triphasé.

Pour pouvoir porter un jugement sur la stabilité dynamique du système de transmission considéré, nous avons provoqué des courts-circuits tripolaires sur la ligne triphasée en divers points distants de 50 à 250 km de la génératrice. Dans chaque cas, la durée du court-circuit a été de 150 ms et le temps mort d'ouverture, de 300 ms. Nous avons choisi comme critère devant permettre d'évaluer la qualité de la stabilité dynamique la puissance maximale que pouvait fournir la génératrice avant l'apparition du défaut, sans qu'il en résulte un décrochage.

Il nous a paru opportun de choisir comme système de transmission de référence le cas d'une ligne triphasée à deux ternes. On a pu constater, comme on s'y attendait, que la stabilité dynamique était moins bonne lorsqu'on remplaçait l'une des ternes par une ligne à courant continu dont l'équipement de régulation n'était soumis à aucune influence stabilisante. Cela est dû au caractère asynchrone de la liaison à courant continu qui, si l'on ne fait pas intervenir des influences appropriées dans la régulation ne participe pas du tout à la création d'un couple synchronisant. De telles influences sont nécessaires si l'on désire que la stabilité soit meilleure que celle du système de transmission de référence, ou au moins équivalente.

Comme nous étions intéressés, avant tout, dans notre étude, par l'influence de paramètres de la partie triphasée du système, nous avons choisi de faire intervenir, pour améliorer la stabilité, une augmentation de 50 % de la valeur de consigne du courant continu pendant la durée de la coupure de la ligne triphasée, en même temps qu'une influence dépendant du glissement et destinée à améliorer l'amortissement [7]. Dans la partie triphasée du système, nous avons fait varier non seulement la répartition de la puissance, mais aussi les caractéristiques de régulation de la tension de la génératrice. Comme le montre la figure 7, l'introduction des influences stabilisatrices dans la régulation de la liaison à courant continu a permis d'obtenir, à peu de chose près, même sans chercher à améliorer le maintien de la tension aux bornes du poste redresseur, côté alternatif, la même stabilité dynamique qu'avec la ligne double à courant triphasé. Mais si l'on complétait ces mêmes influences par des mesures améliorant le maintien de la tension, on pouvait alors constater une nette amélioration de la stabilité. Ces considérations sont illustrées par les oscillogrammes de la figure 8.

On est ainsi amené à constater que les conditions de stabilité dépendent fortement des propriétés intrinsèques du système, de sorte qu'il est difficile de formuler des conclusions générales. S'agissant de l'influence d'une liaison à courant continu destinée

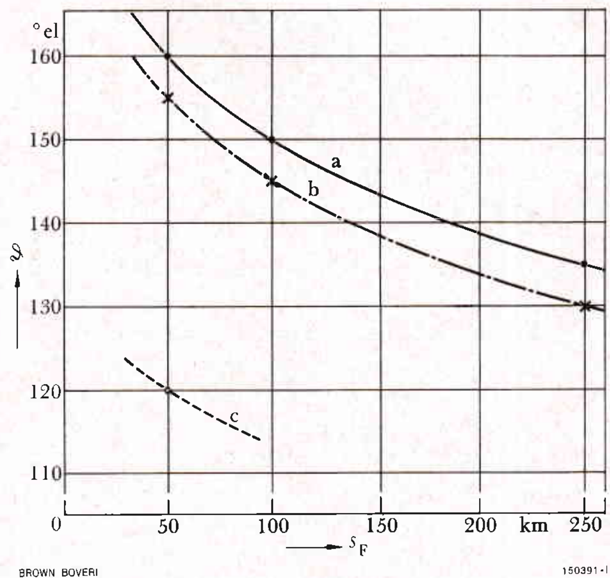


Fig. 7. – Diagramme relatif à la stabilité dynamique

Valeur maximale de ϑ en fonction de l'éloignement du défaut

ϑ = déphasage entre la force électromotrice de la génératrice et la tension du réseau IV

S_F = distance séparant le défaut de la génératrice

a: ligne triphasée à deux ternes

b: lignes triphasée et à courant continu en parallèle, excitation traditionnelle

c: dito, mais avec excitation par convertisseur statique

Fig. 8. – Diagramme relatif à la stabilité dynamique

Oscillogrammes obtenus avec régulation de la ligne à courant continu influencée par des grandeurs stabilisatrices.

a: avec excitation traditionnelle

b: avec excitation par convertisseur statique

$i_=$ = valeur instantanée du courant continu

m_e = couple d'origine électrique s'opposant au couple moteur

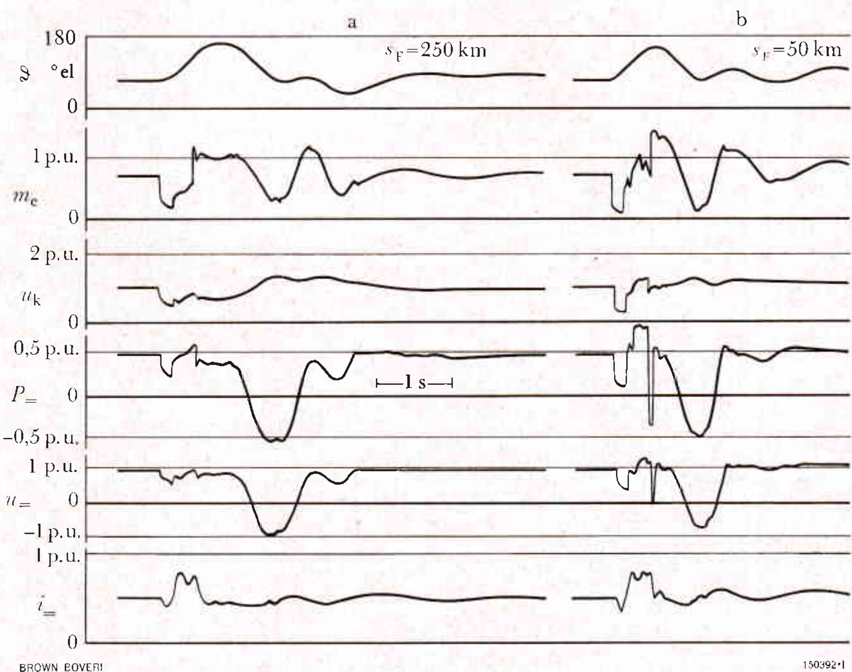
$P_=$ = puissance transmise par la ligne à c.c.

S_F = distance séparant le défaut de la génératrice

$u_=$ = tension continue du poste redresseur

u_k = tension aux bornes de la génératrice

ϑ = angle de déphasage entre la force électromotrice de la génératrice et la tension du réseau IV



à améliorer la stabilité dynamique d'un système, on peut dire qu'une telle liaison devrait être capable de transmettre une puissance aussi grande que possible pendant la durée de la perturbation et juste après son élimination. Bien qu'il soit possible, en principe, en raison des caractéristiques de régulation de la ligne à courant continu, d'augmenter rapidement et pendant une brève durée la puissance transmise, cette augmentation est limitée par le courant maximal que peuvent débiter, pendant cette durée, les soupapes des postes de conversion. Il s'ensuit que la puissance supplémentaire que peut transmettre la ligne à courant continu, sous une tension réduite, n'est pas toujours suffisante. On peut toutefois remédier à cette situation en choisissant pour le fonctionnement normal des soupapes une valeur plus élevée de l'angle de retard et en faisant en sorte que la baisse de tension dans les stations de conversion soit aussi faible que possible. Nos essais ont montré que même sans avoir cherché à optimaliser le signal agissant sur la régulation de la ligne à courant continu, mais en prenant des mesures pour assurer le maintien de la tension, on a pu obtenir, grâce à la ligne à courant continu, une stabilité dynamique sensiblement meilleure que celles d'un système fonctionnant entièrement en courant triphasé avec des régulateurs traditionnels.

Conclusions

L'étude à laquelle nous avons procédé montre que si l'on ne fait pas agir des influences stabilisantes dans la régulation de la ligne à courant continu, l'amortissement du système est peu modifié et que la stabilité dynamique du système comprenant une liaison à courant continu est moins bonne que celle du système équivalent fonctionnant uniquement en courant triphasé. Il faut en voir la cause dans le caractère asynchrone de la ligne à courant continu. Mais les larges possibilités de régulation de cette ligne permettent, par l'introduction de signaux appropriés dans le circuit de régulation, de lui faire jouer un rôle stabilisateur, tant au point de vue de la stabilité statique que de la stabilité dynamique. Les signaux nécessaires pour améliorer la stabilité par des variations de la puissance transmise par la liaison à courant continu sont dérivés surtout de grandeurs en jeu dans la partie à courant triphasé du système, grandeurs qui, d'ailleurs, exercent aussi une influence favorable sur la stabilisation naturelle du système purement à courant triphasé. Ce sont les déphasages entre les tensions des barres omnibus situées aux deux extrémités des lignes de transmission et leurs dérivées par rapport au temps. On peut également tirer les grandeurs d'influence agissant sur la régulation d'autres grandeurs en jeu dans le système et liées aux premières, de sorte qu'il existe un très grand nombre de possibilités. L'insertion d'une ligne à courant continu dans un réseau triphasé présente l'avantage de permettre de choisir librement le degré d'amplification appliqué aux signaux utilisés pour influencer la régulation et de l'adapter à différentes conditions d'exploitation. S'il existe une limite de l'effet de la liaison à courant continu, surtout en ce qui concerne l'amélioration de la stabilité dynamique, elle réside dans la limite naturelle de la puissance pouvant être transmise par cette liaison. C'est pour cette raison que le maintien de la tension aux bornes des postes de conversion, côté triphasé, est extrêmement important. La stabilité d'un réseau triphasé peut donc être sensiblement améliorée par insertion de liaisons à courant continu si l'on tient compte de la structure des systèmes triphasés raccordés aux bornes des postes de conversion.

(P. H.)

JOSEF KÄUFERLE et
ERICH PRÖLL

Bibliographie

[1] A. DE QUERVAIN et W. FREY: Méthodes employées pour le réglage de réseaux interconnectés. *Rev. Brown Boveri*, t. 44 (1957), n° 11, p. 472 à 487.

[2] S. BOICHIDZE: Sur le fonctionnement en parallèle d'une liaison à courant continu et à réglage automatique avec une ligne de transport d'énergie à courant alternatif. *Rev. gén. Elect.*, t. 70 (1961), n° 10, p. 503 à 509.

[3] H. P. KOSTENKO, G. R. GERSTENBERG: Automatic Regulation and Stability in Parallel Operation of Generators into AC and DC Lines. *Elektrichestvo* (1962), n° 10, p. 1 à 9.

[4] E. UHLMANN: Stabilisation of an AC Link by a Parallel DC Link. *Direct Curr.*, vol. 12 (1964), n° 8, p. 89 à 94.

[5] T. MACHIDA: Improving Transient Stability of AC System by Joint Usage of DC System. *IEEE int. Conv. Rec.* (1965), n° 1, p. 37 à 44 et *IEEE Trans. Pwr Appar. & Syst.*, vol. 85 (1966), n° 3, p. 226 à 232.

[6] R. FOERST, G. HEYNER, K. W. KANNGIESSER, M. BECKER: Untersuchung von Schutz- und Regelungsproblemen in der Modellanlage Rheinau. *Elektrotech. Z. Ausg. A*, vol. 89 (1968), n°s 8 et 9. Des tirés à part peuvent être obtenus auprès des sociétés AEG-Telefunken, Brown Boveri et Siemens.

[7] R. JOETTEN et R. FOERST: Etudes sur modèle du comportement d'installations pour le transport en courant continu à haute tension au cours de perturbations sur les réseaux à courant alternatif et à courant continu. *Rapport CIGRE*, n° 43-08, 1968.

[8] TH. LAIBLE: Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb. Un vol. éd. par Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1952.

[9] H. A. PETERSON, P. C. KRAUSE: Damping of Power Swings in a Parallel AC and DC System. *IEEE Trans. Pwr Appar. & Syst.*, vol. 85 (1966), n° 12, p. 1231 à 1239.

La machine asynchrone synchronisée et ses applications aux cas spéciaux

621.313.33.072.9

La machine asynchrone synchronisée, employée jusqu'ici dans la technique de l'entraînement, est aujourd'hui utilisée également comme génératrice de différentes manières. L'auteur décrit dans le présent article le fonctionnement en moteur et les possibilités d'application de cette machine utilisée en génératrice ainsi que quelques constructions spéciales développées à cet effet.

Le moteur asynchrone synchronisé a trouvé des applications relativement nombreuses. Ceci est dû à ses propriétés favorables qui lui permettent de par exemple maîtriser la situation lors de démarrages dans des conditions sévères de couples résistants et de moments d'inertie de machines entraînées, et ceci dans les cas où l'emploi des moteurs synchrones à pôles saillants doit être évité ou très limité, ainsi que dans les cas où les machines asynchrones ne peuvent pas être employées. La théorie et les caractéristiques de cette machine sont connues depuis longtemps. Nous ne ferons état ici que des points les plus importants, lesquels servent en partie de référence dans les applications de ce principe aux machines spéciales.

Structure et fonctionnement

Le moteur asynchrone synchronisé dont le stator et le rotor sont construits comme dans un moteur à bagues triphasé, est mis en vitesse à l'aide de résistances métalliques ou de résistances liquides de démarrage. Après le démarrage asynchrone et le court-circuitage des résistances de démarrage, on enclenche l'excitation à courant continu à l'aide de contacts

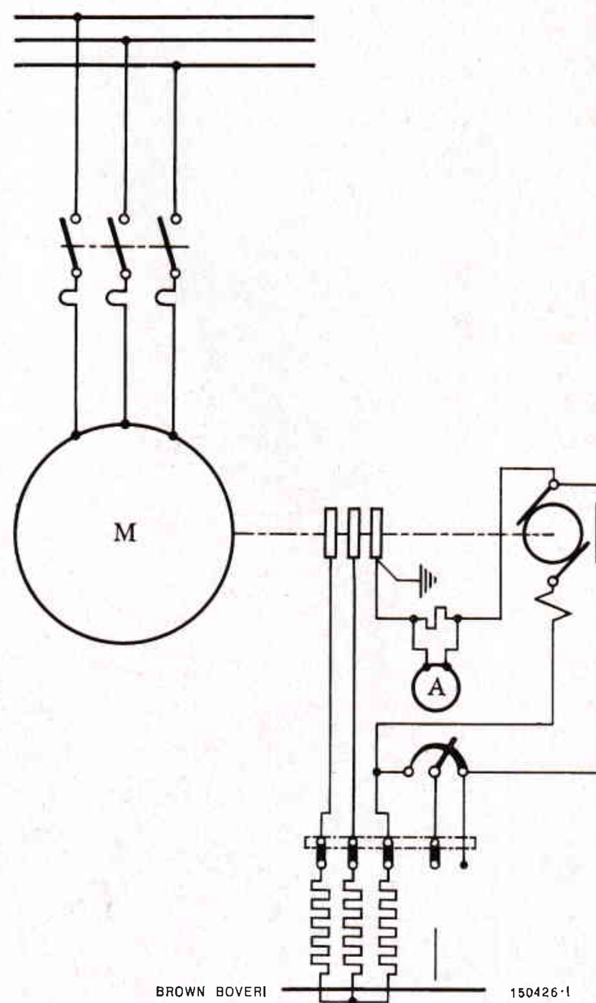


Fig. 1. – Schéma de principe du moteur asynchrone synchronisé

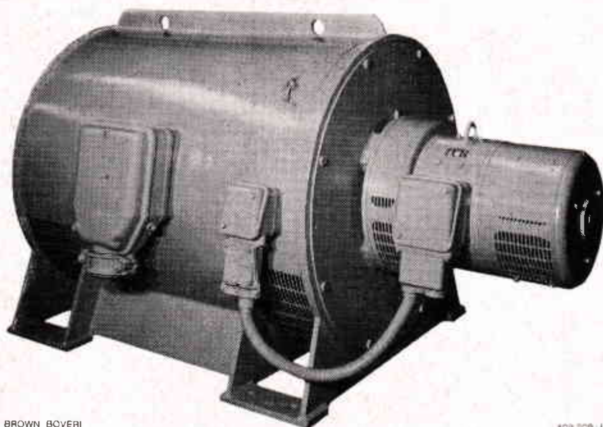


Fig. 2. – Moteur asynchrone synchronisé avec excitatrice en bout d'arbre

destiné à une installation de four à cuve de cimenterie.

auxiliaires se trouvant sur le combinateur. En marche en moteur et pour un nombre de pôles de quatre ou plus, le couplage série-parallèle de l'enroulement triphasé dont il est question ici et qui peut se trouver dans le rotor ou dans le stator, est favorable pour l'excitation à courant continu. En marche synchrone, les deux enroulements de phase court-circuités agissent tel un enroulement amortisseur. Pour l'excitation en courant continu, on utilise le plus souvent des excitatrices du type classique montées en bout d'arbre ou en groupes de machines séparés. L'induit de l'excitatrice est relié en permanence à une phase du rotor du moteur asynchrone synchronisé devant être excité; l'excitatrice n'est enclenchée qu'un peu avant la synchronisation. Le démarrage se fait donc sans excitation à courant continu perturbatrice (fig. 1).

Dans les dispositifs d'excitation statiques, utilisés souvent aujourd'hui, l'enclenchement de l'excitation a normalement lieu par l'ouverture du circuit à diodes, court-circuité pendant le démarrage. Dans tous les cas, la synchronisation est effectuée avec une excitation à courant continu plus forte qu'en régime nominal. Les dispositifs d'excitation à courant continu, mis au point à ce jour, peuvent, pour les conditions de synchronisation relativement faciles, être maintenus simples dans leur structure, l'adaptation du facteur de puissance à la charge pouvant se faire grossièrement. Dans des conditions de synchronisation rendues difficiles au point de vue du couple résistant et du moment d'inertie extérieur à vaincre, la surveillance de l'instant d'enclenchement de l'excitation, favorable à la formation du couple, est importante. Contrairement aux moteurs asynchrones, les moteurs asynchrones synchronisés font sans cesse l'objet de conceptions particulières de telles sorte que, jusqu'aux puissances élevées, il est presque toujours possible d'amener à des valeurs raisonnables la tension d'arrêt et le courant d'excitation et ceci sans devoir prendre des mesures spéciales telles que l'utilisation d'enroulements commutables ou d'enroulements auxiliaires. Par ailleurs, il est possible de faire marcher le moteur en asynchrone également à pleine charge (fig. 2).

Possibilités d'application

La machine asynchrone synchronisée peut être utilisée comme alternateur synchrone, ce qui constitue un avantage dans certains cas particuliers. Dans la marche en génératrice, la valeur de la tension d'arrêt, comme cela apparaît en marche en moteur, n'a qu'une importance réduite, de sorte que l'on peut accroître le nombre de spires du côté in-

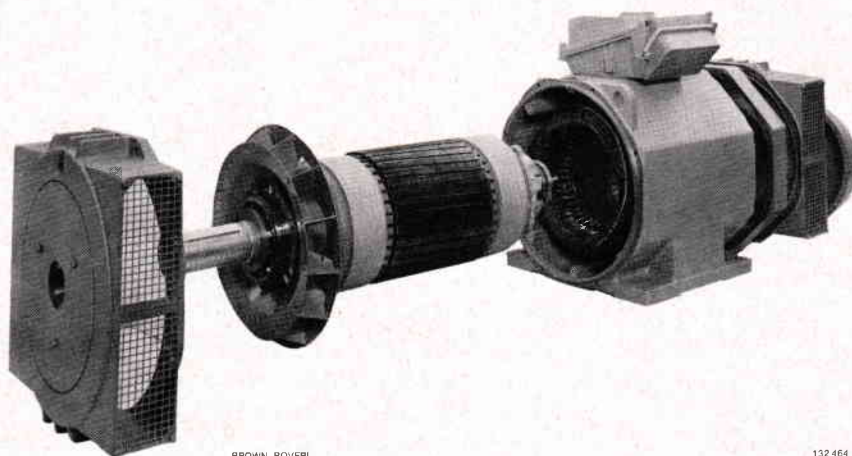


Fig. 3. – Eléments d'une génératrice synchrone du type SJP, 3000 tr/min

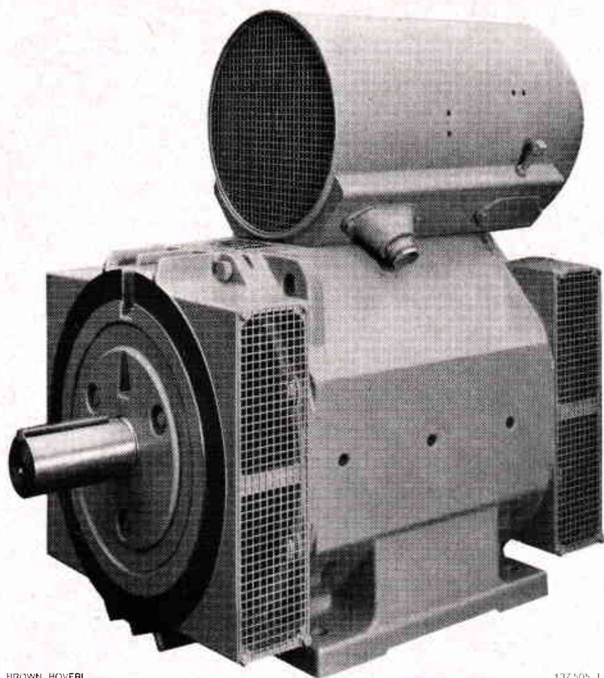


Fig. 4. – Génératrice synchrone du type SJP, 3000 tr/min

surmontée d'une machine d'excitation compound ayant la même structure qu'une machine asynchrone.

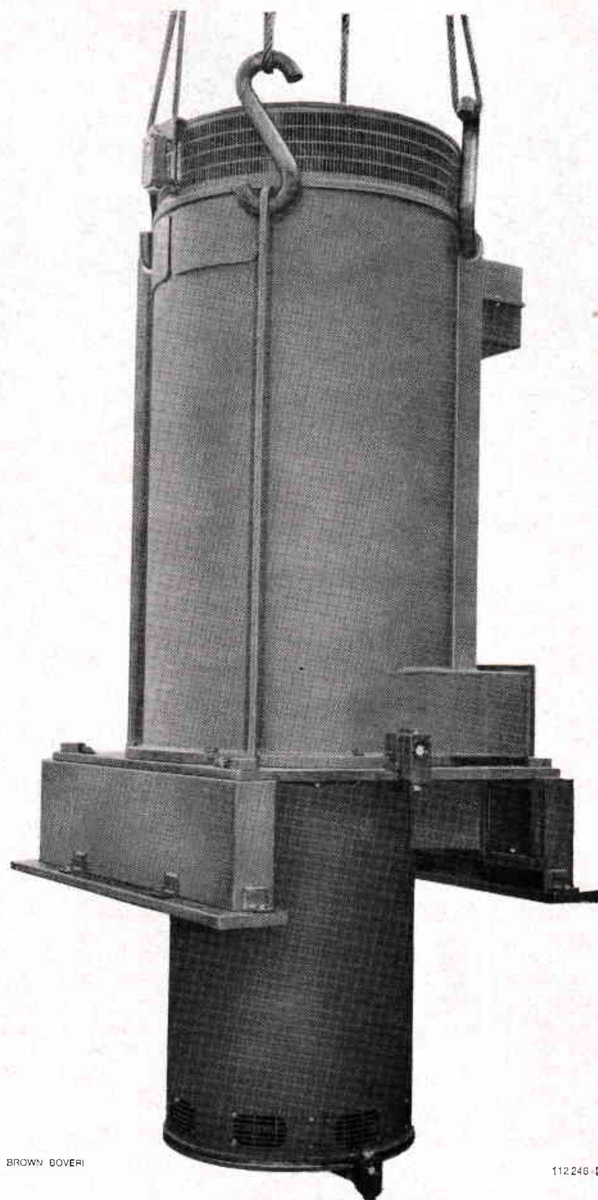


Fig. 5. – Génératrice synchrone monophasée, 150 Hz, avec moteur à cage d'écureuil monté en bout d'arbre

destinée à l'alimentation d'une installation de soudage à moyenne fréquence.

ducteur; cela équivaut à de faibles courants d'excitation sous des tensions élevées. Ces machines sont construites comme génératrices excitées par le rotor ou par le stator. Une conception spéciale permet de placer beaucoup de cuivre dans la partie inductrice et de maintenir ainsi les puissances d'excitation relativement faibles.

Grâce aux propriétés du moteur à pôles noyés avec courbe d'excitation de champ favorable, on obtient un taux d'harmoniques particulièrement bas; on peut atteindre, sans grosses dépenses, une valeur de 3 % et de 1 % dans certains cas particuliers. Avec le couplage série-parallèle ou le couplage en série de deux enroulements de phase, l'enroulement de la troisième phase étant court-circuité, en couplage en étoile, on obtient un bon effet d'amortissement pour un prix réduit. La construction feuilletée est de plus appropriée aux petites vitesses de régulation dans le cas des processus non stationnaires. De telles génératrices ont été livrées pour instituts de physique, laboratoires et stations d'essais, c'est-à-dire pour les cas où le taux d'harmoniques déjà mentionné ne peut pas être obtenu avec les génératrices à pôles saillants ou bien les dépenses entraînées sont très élevées.

Un des avantages de cette machine est la construction simple de son rotor, comparativement à celle du rotor à pôles saillants souvent compliquée, qui permet de loger un enroulement triphasé normal à deux étages. La forme et la grandeur constantes des têtes de bobines ainsi que la distribution régulière et symétrique du cuivre de l'enroulement à la périphérie de l'induit permettent un frettage simple et à bon marché; ce qui présente, surtout pour les vitesses élevées, une solution avantageuse pour répondre aux contraintes dues aux forces centrifuges.

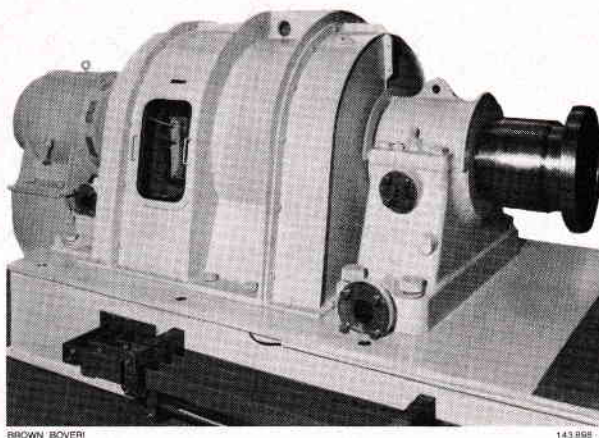


Fig. 6. – Excitatrice à courant alternatif, 800 kVA, 325 V, 180 Hz, 3600 tr/min

destinée à l'excitation d'un turbo-alternateur de 116 MW au moyen d'un redresseur.

Cette exécution est par exemple appliquée aux génératrices, du type SJP, prévues pour une puissance de 400 kVA et des vitesses de rotation de 3000 et 3600 tr/min (fig. 3 et 4). En partie, ces génératrices sont équipées d'un système de compoundage d'un genre nouveau, qui permet d'obtenir, avec un couplage simple, une bonne constance de tension, indépendamment du facteur de puissance et sans devoir recourir à d'autres appareils de réglage.

L'extension du principe de la machine asynchrone synchronisée a conduit aux alternateurs synchrones à moyenne fréquence qui sont construits pour des fréquences atteignant 400 Hz. En utilisant les modèles existants de machines asynchrones, on peut obtenir toutes les conditions et les fréquences usuelles exigées par le client, tout en évitant des constructions particulières de la roue polaire. Ce principe permet l'application de vitesses de rotation élevées et rend par suite possible la fabrication de machines à bon marché.

On a construit des génératrices réglables à moyenne tension, utilisées souvent comme génératrices



Fig. 7. – Rotor d'une excitatrice à courant alternatif de 800 kVA, 3600 tr/min

monophasées (fig. 5) ou destinées aux plates-formes d'essais, aux applications militaires, à la sécurité du vol et aux machines-outils, ces dernières avec fréquence donc vitesse de rotation réglée. Une autre application est constituée par l'alimentation des moteurs de soufflantes de réacteurs à paliers à gaz, à vitesse de rotation réglée, au moyen de génératrices à 200 Hz du type mentionné.

Ce type de génératrice est utilisé dans les cas où les convertisseurs de fréquence asynchrones ne peuvent pas être utilisés. Ici également, le faible taux d'harmoniques a de l'importance, car il est même souvent exigé.

Les propriétés précitées de la machine asynchrone synchronisée ont conduit à l'utiliser comme excitatrice à courant alternatif pour des alternateurs de grosses puissances telles que les turbo-alternateurs. Les excitatrices à courant alternatif sont directement accouplées à l'arbre du turbo-alternateur, et ont, en liaison avec les redresseurs au silicium, amplement supplanté l'excitatrice classique à courant continu, même lorsque la puissance limite de celle-ci n'est pas atteinte et qu'aucun train d'engrenages n'est requis. La suppression du collecteur et du train d'engrenages conduit à une sécurité de service accrue et à un entretien simplifié.

On peut construire ce type d'excitatrice à courant alternatif (fig. 6 et 7) jusqu'à des vitesses périphériques du rotor supérieures à 100 m/s, avec des frettes de fils disposées sur les têtes de bobine rotoriques, c'est-à-dire sans utiliser des frettes proprement dites.

On peut également fournir, par ce moyen, les puissances d'excitation nécessaires aux turbo-alternateurs de grosses puissances unitaires.

Le comportement au point de vue de la technique de la régulation de l'excitatrice à courant alternatif mérite une attention particulière. Dans un réseau de distribution, on s'efforce, pour des raisons de tenue de tension et de stabilité, de s'opposer aussi rapidement que possible aux perturbations apparaissant dans tout système d'excitation possible, en faisant varier le champ en conséquence. C'est pourquoi, il est souhaitable de disposer d'excitatrices à courant alternatif avec de bonnes propriétés dynamiques. Le type mentionné offre largement ces avantages. Son circuit magnétique entièrement feuilleté est favorable et permet de maintenir petites les pertes supplémentaires dues à la charge du redresseur. Sans recourir à un amortisseur spécial, on obtient dans la phase court-circuitée un effet d'amortissement avantageux, surtout dans l'axe transversal, ce qui met en relief la propriété du rotor à pôles noyés. Pour des fréquences égales à trois à six fois la fréquence de réseau, les constantes de temps

et les réactances transitoires de la machine asynchrone synchronisée sont relativement petites, de sorte qu'on peut obtenir une vitesse de régulation déterminée avec une surexcitation comparativement plus petite. Pour un problème donné, l'excitatrice à courant alternatif mentionnée permet de se tirer d'affaire avec une puissance de type plus petite que dans le cas d'une machine classique.

Un autre avantage de ces excitatrices consiste en ce qu'elles peuvent fonctionner non seulement en génératrice mais aussi en moteur asynchrone, c'est-à-dire qu'elles servent dans ce cas comme moteurs de démarrage, par exemple dans un groupe de turbines à gaz.

Dans la plupart des cas, on a choisi jusqu'ici des constructions à rotor excité. Pour les génératrices principales ne possédant pas de bagues, avec diodes montées sur l'arbre, l'induit de ces excitatrices est fixe (stator), ce qui permet d'obtenir les propriétés mentionnées.

(A.G.) HANS KÖHLER

Servo-mécanismes électriques de haute précision

621.313.13:621-526

Les servo-mécanismes électriques décrits présentent des propriétés de démarrage, de freinage et de poursuite qui permettent de réaliser à un prix favorable des dispositifs d'entraînement à réponse plus rapide que jusqu'à présent, surtout pour les machines avec dispositifs de copiage et les machines avec commande numérique pour usinage continu.

Après la comparaison des servo-mécanismes électriques Brown Boveri avec les équipements d'entraînement hydrauliques usuels, les éléments de base des servo-mécanismes, c'est-à-dire le moteur Minertia MM, l'unité d'alimentation et de régulation à thyristors TEAM et les dispositifs auxiliaires sont traités en détail, et leurs montage, propriétés électriques et fonctionnement représentés d'une façon circonstanciée.

L'article est complété par le calcul du couple d'accélération exigé pour les moteurs Minertia.

Servo-mécanismes électriques

L'extension rapide de l'électronique et les exigences croissantes correspondantes, posées aux machines et centres d'usinage à commande électronique, ont fait apparaître la nécessité d'adaptation de la technique de l'entraînement aux conditions plus exigeantes.

Avec la série MM/TEAM, nouvellement mise au point, la Société Brown Boveri présente des servo-mécanismes qui répondent aux exigences sévères posées quant à une grande précision, aux temps d'inversion les plus courts, à la limite de température élevée, ainsi qu'à un service ne demandant qu'un entretien réduit, et qui possèdent de plus une marge supplémentaire.

Les servo-mécanismes complets sont composés d'un moteur Minertia (MM), de l'appareil d'alimentation et de régulation à thyristors standardisé (TEAM), qui en fait partie, et d'appareils accessoires tels que les bobines d'inductance pour courants de circulation, la dynamo tachymétrique et le transformateur intermédiaire. Ils permettent un ajustage continu de la vitesse de rotation, de la marche lente jusqu'à la marche rapide, et l'adaptation aux machines-outils avec dispositifs de copiage et aux machines avec commande numérique pour usinage continu. Comme le montrent les caractéristiques techniques ci-dessous, les possibilités d'application des servo-mécanismes Brown Boveri sont multiples:

Domaine de puissance pour la vitesse nominale		0,18 à 6 kW
Vitesse de rotation nominale		0 à 3000 tr/min
Domaine de réglage avec une grande constance de vitesse		1:1000
Temps de mise en vitesse de 0 à 3000 tr/min (fig. 1)	env.	35 à 50 ms

Le temps de démarrage donné n'est valable que si le moment d'inertie de la machine entraînée, rapporté à l'arbre du moteur Minertia, est inférieur ou égal au moment d'inertie propre du rotor.

Tension d'alimentation de la partie à courant fort: 220, 380 ou 415 V, 50 ou 60 Hz

Tension d'alimentation de la partie électronique: en général 380 V, 50 ou 60 Hz; commutable intérieurement 220 V, 50 ou 60 Hz; pour des tensions supérieures à 380 V, un transformateur d'adaptation est nécessaire, courant absorbé 200 mA

Tension de consigne
Source de tension interne:
tension continue de $\pm$ 24 V, $\pm$ 2%; variations de tension de réseau admissibles: + 10%, − 15%; courant: 10 mA

Source de tension externe:
tension continue de $\pm$ 10 V au minimum, de $\pm$ 24 V au maximum

Ondulations résiduelles (rapportées à la tension de consigne maximale)
$\leqslant$ 0,5‰

Température ambiante maximale admissible:
+ 55 °C

Le domaine des valeurs nominales du couple s'étend de 6 à 200 kpcm; avec des temps de repos appropriés, des valeurs maximales du couple de 60 à 2000 kpcm peuvent être atteintes pour des charges de courte durée, dix fois supérieures.

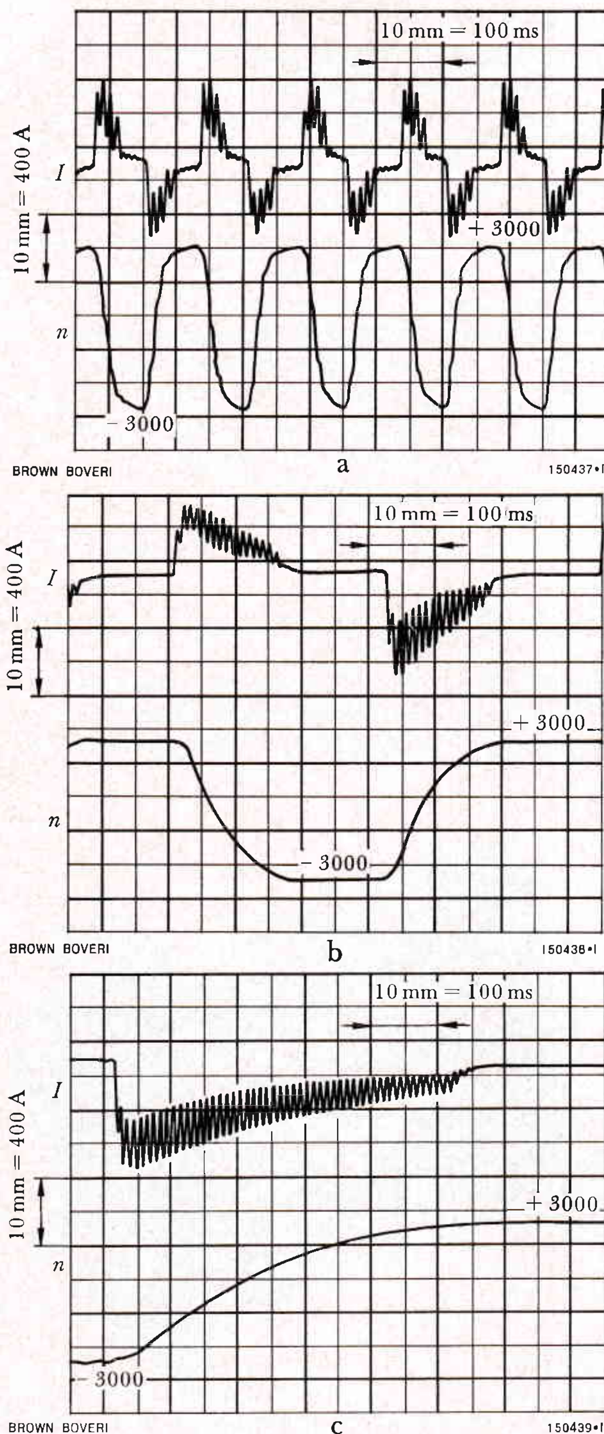


Fig. 1. – Temps d'inversion avec un moteur Minertia JKMM-200SR et TEAM-200, relevés au laboratoire (les types plus petits ont des valeurs encore meilleures)

a: moment d'inertie de la machine entraînée beaucoup plus petit que celui du moteur
b: moment d'inertie de la machine entraînée égal à celui du moteur
c: moment d'inertie de la machine entraînée = 6,5 × moment d'inertie du moteur

I = courant en A
n = vitesse de rotation en tr/min

Le moteur d'entraînement Minertia est un moteur à courant continu robuste avec des caractéristiques extraordinaires, grâce à son rotor élancé et sans encoches. Le démarrage, le freinage et le réglage du moteur se font par un appareil d'alimentation et de régulation à thyristors, en couplage antiparallèle à rapport de pulsation deux, en exécution monophasée à deux alternances et point médian (TEAM). La valeur instantanée est fournie par une dynamo tachymétrique de grande précision, montée à l'aide d'un accouplement spécial, sans jeu en aluminium en bout d'arbre du moteur Minertia du côté opposé à l'entraînement. Les appareils TEAM, en montage monophasé à deux alternances sont connectés au réseau existant (220, 380 ou 415 V, 50 ou 60 Hz) par l'intermédiaire de fusibles côté primaire, de disjoncteurs et d'un transformateur.

Le choix des servo-mécanismes se fait en relation avec les conditions dynamiques posées, relatives aux parties de machine devant être entraînées, aux cycles de travail désirés et aux temps d'inversion, ainsi qu'en fonction des conditions ambiantes. L'adaptation de la caractéristique dynamique d'un dispositif d'entraînement peut se faire facilement, lors de sa mise en service, par insertion des circuits correspondants.

La comparaison avec les systèmes d'entraînement hydrauliques, souvent utilisés jusqu'ici dans les machines-outils, donne pour les servo-mécanismes électriques un résultat absolument favorable (voir le tableau I).

Les propriétés excellentes de ces systèmes permettent un domaine d'application étendu:

a. comme dispositifs de commande d'avance et de réglage:
   - dans tout le domaine des machines-outils en relation avec les dispositifs de copiage et les machines à commande numérique pour usinage continu de tous genres,
   - pour tables à coordonnées

b. comme dispositif d'entraînement de réglage:
   - pour manipulateurs des tramways et trolleybus,
   - pour les grandes antennes,
   - pour installations de barres de commande dans les réacteurs nucléaires,
   - en relation avec des installations de coulée continue

c. **également dans tout le domaine de construction des machines pour l'industrie transformatrice.**

TABLEAU I

Comparaison des systèmes d'entraînement hydrauliques et électriques

	Servo-mécanisme Brown Boveri	Systèmes d'entraînement hydrauliques
Possibilité de réglage	bonne	bonne, les soupapes de réglage permettent des domaines d'ajustage étendus
Temps de réponse	avec le moteur Minertia, on obtient les mêmes valeurs qu'avec les systèmes hydrauliques	très petit, parce qu'on a un PD^2 petit avec de grands couples
Montage	facile, pouvant se faire dans certaines conditions par un personnel mis au courant	difficile, exigeant une grande propreté, des tubes pour des pressions élevées, problèmes d'étanchéité
Changement de place	facile, pouvant être enfichable	difficile, à cause du raccordement par vis des tubes sous pression
Niveau sonore	bas	élevé, à cause des groupes de pompes
Refroidissement	seulement des ventilateurs séparés de 100 W sont nécessaires pour le moteur Minertia	toujours nécessaire (refroidissement par eau ou par air)
Prix d'achat	presque pareil	
Frais de mise en service	presque pareils	
Frais d'exploitation	petits, les pièces de rechange peuvent être mises en place par les électriciens de l'entreprise	élevés, des spécialistes sont nécessaires pour l'entretien, huile spéciale et des frais courants élevés pour le refroidissement

Le moteur Minertia

Structure

La structure et les dimensions de l'induit sont très différentes de celles des machines à courant continu normales. Un noyau en tôles d'acier au silicium sans encoche est calé sur l'arbre en acier inoxydable du moteur dont les deux bouts sont usinés; le noyau supporte l'enroulement d'induit. Le montage entièrement nouveau de l'enroulement d'induit lié par des rubans de verre et imprégné sous vide d'une résine époxyde haut polymère donne un rotor élancé avec un moment d'inertie très petit. Le petit diamètre du rotor permet de bonnes propriétés de marche et un équilibrage facile des moteurs. Deux pôles d'aimant permanent créent, dans les types JKMM-6EM à JKMM-25EM, un champ constant; à partir de JKMM-50SR, les moteurs possèdent leurs propres enroulements inducteurs.

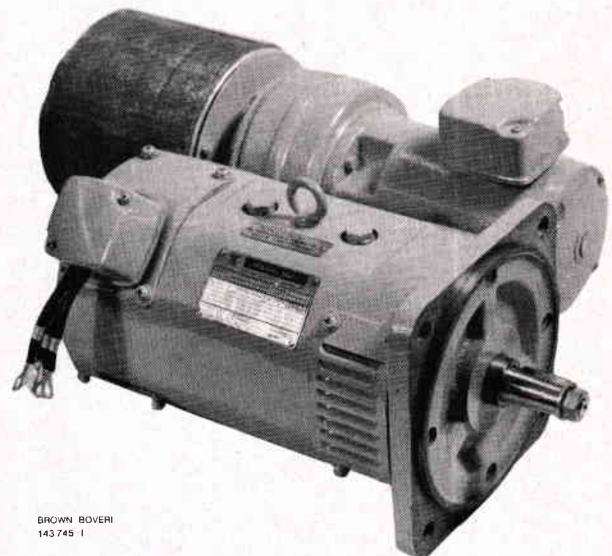


Fig. 3. – Moteur Minertia JKMM-50 SR-22 avec ventilateur et filtre

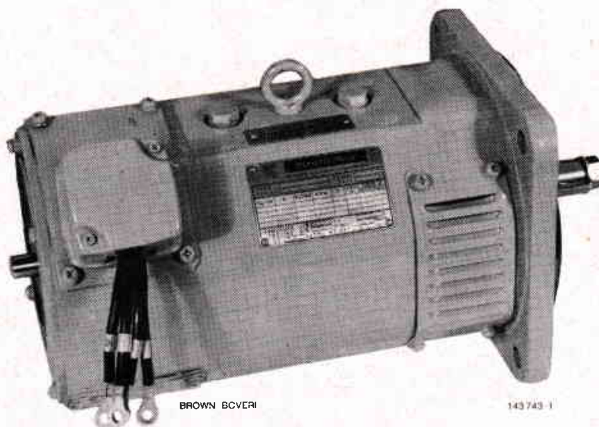


Fig. 2. – Moteur Minertia JKMM-50 SR-22 sans ventilateur

La forme extérieure des nouveaux moteurs Minertia est très plaisante (fig. 2 et 3). Les carcasses octogonales en fonte, avec bride côté entraînement, sont entièrement fermées (IP33) pour les types JKMM-6 EM jusqu'aux types JKMM-25 EM; pour les types à partir de JKMM-50 SR, des ouvertures sont prévues pour l'utilisation de ventilateurs avec filtres ou pour raccordement à un système de ventilation central (IP22). L'exécution standard des moteurs comporte, côté entraînement, un bout d'arbre conique (conicité 1:10, précision: $\pm 0{,}0004$) avec clavette, rainure et filetage métrique terminal, et côté opposé un bout d'arbre cylindrique également avec clavette et rainure pour l'accouplement de la dynamo tachymétrique, ainsi qu'une boîte à bornes fixée sur la carcasse. Les ventilateurs peuvent être décalés de 180° et les boîtes à bornes de 90°.

Caractéristiques électriques

La construction spéciale du rotor, avec conducteurs à la surface du noyau en tôle d'acier au silicium, permet des dimensions d'enroulement beaucoup plus petites. La suppression des encoches fait que l'inductance d'induit devient très petite, ce qui influence favorablement la commutation. Un entrefer relativement grand maintient la réaction d'induit petite, et a pour effet une formation rapide du couple.

Les constantes de temps d'induit (L/R) sont selon le type du moteur comprises entre environ 1 et 5 ms. Des vitesses d'accroissement de courant les plus grandes, la possibilité de grosses surcharges de courte durée et les faibles moments d'inertie d'induit des moteurs Minertia conduisent à des temps de démarrage – pour passer de 0 à 3000 tr/min – inférieurs à 10 ms, à condition que le courant d'accélération nécessaire puisse croître assez rapidement (fig. 4).

La fréquence de manœuvre dépend surtout des valeurs moyennes des courants maximaux et des temps de repos qui suivent, ainsi que des conditions ambiantes. A ce sujet, nous rappelons que plus est petit le couple d'accélération nécessaire rapporté au couple nominal, plus grand peut être la fréquence de manœuvre.

La vitesse de rotation nominale des moteurs Minertia (voir tableau II) de la série standardisée est de 3000 tr/min; on peut obtenir des vitesses les plus

TABLEAU II

Caractéristiques techniques des moteurs Minertia, types JKMM-6EM à JKMM-2000SR

Type	M_n kpcm	M_{max} kpcm	I_n A	I_{max} A	U_n V	n tr/min	P_n kW	PD^2 kgcm²	Const. méc. ms	Const. électr. ms	Accélé. 10^3 rad/s²	Excitation A	R Ω	Poids kp
JKMM-6 EM	6	60	6,3	63	41	3000	0,18	2,2	4,7	0,95	9,7	–	–	9
JKMM-13 EM	13	130	7,2	72	71	3000	0,39	5,72	4,6	1	8,9	–	–	13
JKMM-25 EM	25	250	12,9	129	73	3000	0,75	12,5	4,2	1,9	7,9	–	–	25
JKMM-50 SR	50	500	13,5	135	137	3000	1,5	23,2	3,2	1,7	8,5	3	31	40
JKMM-100 SR	100	1000	32	320	110	3000	3	59,2	3	2,6	6,6	3,4	32	59
JKMM-200 SR	200	2000	53	530	129	3000	6	211	3,4	4,6	3,7	4,4	26	90
JKMM-500 SR	500	5000	71	710	158	2000	10	840	4,1	9	2,5	10	7,5	350
JKMM-1000 SR	1000	10000	109	1090	156	1500	15	2400	5	13	1,63	12	7,25	700
JKMM-2000 SR	2000	20000	108	1080	210	1000	20	6320	4,6	19	1,25	18	4	930

M_n = couple nominal
M_{max} = couple maximal (pour une courte durée, 100 ms au maximum)
I_n = courant nominal
I_{max} = courant maximal pour M_{max}
U_n = tension continue nominale de moteur
n = vitesse de rotation nominale
P_n = puissance nominale
PD^2 = moment d'inertie du moteur
R = résistance de l'enroulement de champ à 20 °C

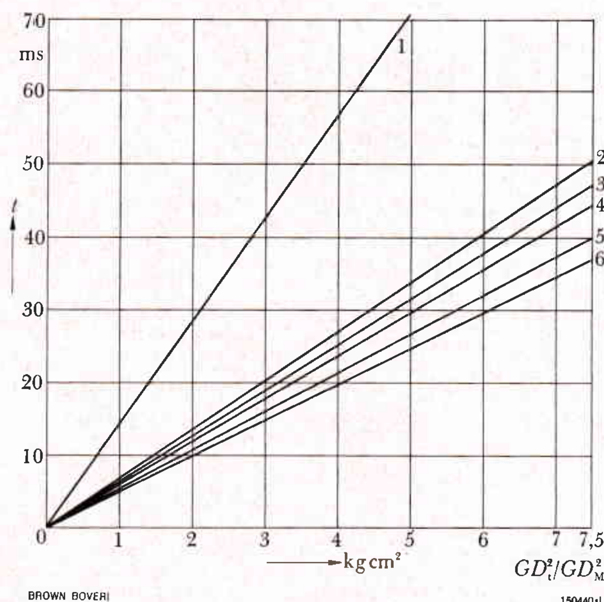


Fig. 4. – Temps de démarrage (0 à 3000 tr/min) des moteurs Minertia JKMM-6EM à JKMM-200SR

Hypothèse: couple maximal = 6 × couple nominal (correspondant à la valeur moyenne obtenue en pratique).

t = temps de démarrage de 0 à 3000 tr/min

PD^2_t = moment d'inertie total (charge + moteur)

PD^2_M = moment d'inertie du moteur

1 = JKMM-200 SR	4 = JKMM- 13 EM
2 = JKMM- 25 EM	5 = JKMM-100 SR
3 = JKMM- 50 SR	6 = JKMM- 6 EM

petites, même une fraction de tour, par une alimentation adéquate. Des vitesses de rotation jusqu'à 4000 tr/min sont possibles (augmentation de la tension d'induit), auquel cas on obtient comme couple nominal, 50 % et, comme couple maximal, 600 % du couple nominal à 3000 tr/min, et le facteur de marche maximal admissible serait 20 %.

Les moteurs Minertia peuvent supporter des contraintes thermiques, magnétiques et électriques élevées. La température maximale admissible du rotor atteint environ 100 °C pour une température ambiante de 40 °C (mesurée par la méthode de la résistance). En service intermittent, la valeur efficace du courant est le facteur le plus important (comme il sera montré plus en détail au chapitre «calcul»).

Les moteurs Minertia sont protégés contre les échauffements exagérés par des relais thermiques spéciaux (type RHH), qui peuvent être utilisés pour des courants jusqu'à six fois supérieurs au courant nominal du moteur. La valeur nominale peut, de plus, être ajustée dans ces relais dans le domaine de 80 à 120 %.

Si l'on emploie une ventilation séparée centrale au lieu du ventilateur propre du moteur, le débit d'air nécessaire pour les moteurs Minertia, jusqu'à la grandeur JKMM-200 SR, est au minimum de 6 m³/min.

Les moteurs Minertia de la série dite «Large Size», types JKMM-500SR, JKMM-1000SR et JKMM-2000SR (voir tableau II) constituant le prolongement de la série standard utilisée essentiellement dans l'industrie des machines-outils. Ces moteurs avec des puissances nominales de 10, 15 et 20 kW et des couples nominaux de 5 à 20 kpm peuvent également supporter, pendant une courte durée, des charges plusieurs fois supérieures à la charge nominale.

La vente en Europe des moteurs Minertia, qui sont des produits de notre licencié, Yaskawa Electric Mfg. Co., Ltd., Tokyo, est assurée exclusivement par la Société Brown Boveri.

Calcul

Calcul des moteurs Minertia pour des applications aux dispositifs d'entraînement d'accélération et aux dispositifs d'entraînement réversibles:

1. Couple d'accélération nécessaire

Le dimensionnement quant au couple maximal des moteurs Minertia se fait en tenant compte du temps de démarrage exigé (t_H), des moments d'inertie J ou PD^2 des moteurs et des charges à entraîner.

Pour le calcul du couple maximal nécessaire, on a les relations suivantes:

a. pour accouplement direct des moteurs à la machine à entraîner:

$$M = \frac{J \cdot \omega}{t} \quad \text{en kpcm}$$

$$b = \frac{\omega}{t} \quad \text{en rad/s}^2$$

$$M_{max} \geqslant b\,(J_M + J_L) \quad \text{en kpcm}$$

$$M_{max} \geqslant \frac{b}{4g}\,(PD^2_M + PD^2_L) \quad \text{en kpcm}$$

b. pour applications avec trains d'engrenages:

$$M_{max} \geqslant b\left(J_M + \frac{J_L}{k^2}\right) \quad \text{en kpcm}$$

ou:

$$M_{max} \geqslant \frac{b}{4g}\left(PD^2_M + \frac{PD^2_L}{k^2}\right) \quad \text{en kpcm}$$

où $t = t_H - t_T$ en secondes

Avec:

M = couple
M_{max} = couple maximal pouvant être fourni par le moteur
J = moment d'inertie total (somme des moments d'inertie J_M du moteur et J_L de la charge à entraîner)
t = temps d'accélération
t_H = temps de démarrage exigé en s
t_T = temps mort
ω = pulsation en rad/s
b = accélération (à couple constant)
PD^2_M = moment d'inertie du moteur en kgcm²
PD^2_L = moment d'inertie de la charge à entraîner en kgcm²
k = rapport de réduction

Il faut noter que dans le système MM/TEAM, le courant maximal (couple maximal) est limité par des inductances[1].

Lorsqu'il existe des trains d'engrenages il convient de procéder au dimensionnement des moteurs à l'aide du coefficient dit de puissance qui s'exprime par le rapport de la puissance des moteurs à l'unité du temps [kW/s].

En supposant que le moment d'inertie de la machine à entraîner est inférieur ou égal à celui du moteur, on a:

$$M = b_M \cdot J_M \geqslant k\, b_L \left(J_M + \frac{1}{k^2} \cdot J_L\right) \quad \text{en kpcm}$$

si

$$\frac{1}{k^2} \cdot J_L \leqslant J_M,$$

on peut écrire:

$$M = b_M \cdot J_M \geqslant 2 \cdot k \cdot b_L \cdot J_M \quad \text{en kpcm}$$

ou

$$M = b_M \cdot J_M \geqslant 2 \cdot b_L \cdot \frac{J_L}{k} \quad \text{en kpcm}$$

ainsi

$$b_M = 2 \cdot k \cdot b_L \quad \text{en rad/s}^2$$

$$b_L = \frac{n \cdot 2\pi}{60 \cdot t} \quad \text{en rad/s}^2$$

Il en résulte:

$$b^2_M \cdot J_M \geqslant 4 \cdot b^2_L \cdot J_L \quad \text{en kW/s}$$

$$k \geqslant \sqrt{\frac{J_L}{J_M}}$$

où:

$b^2_M \cdot J_M$ = coefficient de puissance du moteur en kW/s
$4 \cdot b^2_L \cdot J_L$ = coefficient de puissance de la machine à entraîner en kW/s

A cet effet, on propose d'accoupler le moteur directement au mécanisme d'avance c'est-à-dire que le pignon de commande, maintenu aussi petit que possible, doit être monté directement sur l'arbre du moteur. Un jeu de flanc de dent ajustable, entre le pignon et les roues de l'ordre de $\frac{1}{100}$ à $\frac{4}{100}$ mm, devrait, si possible, être prévu, étant supposé que le mouvement de rotation des roues dentées a une précision de $\frac{1}{100}$ mm.

Souvent, un contrôle supplémentaire du moteur quant au couple nécessaire pour un service continu est indispensable.

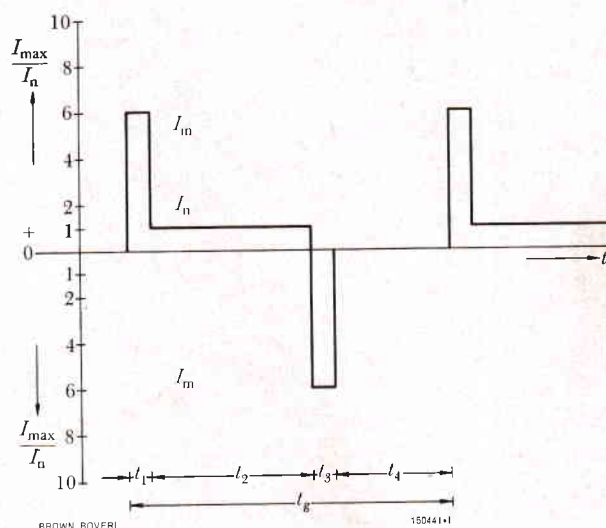


Fig. 5. – Exemple de cycle de travail des moteurs Minertia JKMM-6EM à JKMM-200SR

I_m = valeur moyenne du courant maximal
I_{max} = courant maximal ($10 \times I_n$ au plus)
I_n = courant nominal
t_1 = temps de démarrage
t_2 = service nominal
t_3 = temps de freinage
t_4 = temps de repos
t_g = durée totale d'un cycle de charge

Le courant maximal ($I_{max} = 10 \times I_n$ pendant 100 ms) ne doit pas être dépassé. Des valeurs moyennes du courant maximal supérieures à $6 \times I_n$ ne sont pas recommandées (durée selon la courbe de la figure 6).

[1] Heinz Stüben et Walter Thron: Le moteur Minertia utilisé comme dispositif d'entraînement à réponse rapide pour machines-outils. *Rev. Brown Boveri*, t. 54 (1967), n° 8, p. 503 à 510.

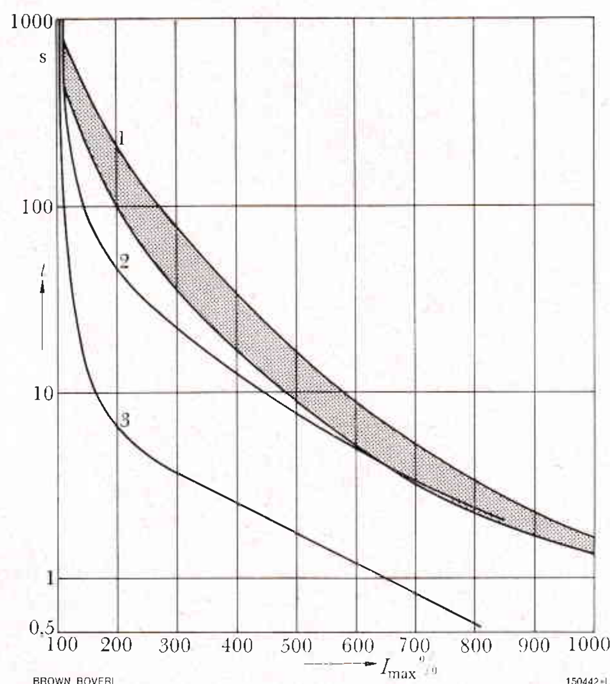


Fig. 6. – Courbes donnant les surcharges pour les moteurs Minertia et les relais thermiques correspondants

I_{max} = courant maximal
1 = valeurs limites de surintensités de moteurs Minertia
2 = caractéristique de déclenchement des relais thermiques RHH à froid
3 = caractéristique de déclenchement des relais thermiques RHH à chaud

2. Contrainte thermique

Pour le service à manœuvres répétées et le service intermittent, la vérification de la contrainte thermique est absolument indispensable (fig. 5 et 6) et peut se faire à l'aide de la formule suivante:

$$I_m = \sqrt{\frac{\Sigma I^2 \cdot dt_n}{t_g}} = I_n \quad \text{en A}$$

avec:

$\Sigma I^2 \cdot dt_n$ = somme des surfaces $I^2 \cdot t$ dans les différentes phases de démarrage, de freinage et de service
I_m = valeur moyenne du courant
I_n = valeur nominale du courant
t_g = durée totale d'un cycle de charge

I^2 ne doit pas dépasser (même pendant un court instant) une valeur égale à dix fois la valeur nominale.

Les puissances et les couples doivent être choisis assez grands afin de couvrir la marge nécessaire à la caractéristique dynamique des différents moteurs.

L'appareil d'alimentation à thyristors TEAM

Structure

Les appareils d'alimentation à thyristors TEAM en couplage monophasé à point médian, mis au point par la Société Brown Boveri remplissent toutes les conditions nécessaires à l'utilisation des caractéristiques supérieures des moteurs Minertia. Les appareils TEAM sont des organes de réglage standardisés, simples, appropriés à l'inversion de polarités. On peut obtenir des temps de démarrage et d'inversion les plus courts si l'on peut admettre des oscillations de vitesse (entraînement de dispositifs de positionnement, par exemple).

L'unité construite à l'aide des éléments éprouvés de la technique électronique Brown Boveri se compose de régulateurs de tension et de vitesse avec filtres, dispositifs de commande de gâchettes et éléments de thyristors, ainsi que des circuits *RC* de protection, réunis en une unité avec des fusibles ultrarapides, des relais thermiques et une réglette à bornes de connexion. Les différents éléments de base sont disposés d'une façon claire et accessible; un éventuel changement d'élément peut se faire sans difficulté. Les appareils TEAM sont entièrement câblés et prêts à être connectés; les départs aboutissent à une réglette à bornes montée au bas de la plaque-support. Aucun appareil supplémentaire ne doit être monté sur la plaque de base de l'appareil. Pour les gros moteurs, un dispositif d'alimentation pour l'enroulement de champ (fig. 7 et 8) est monté sur une plaque séparée.

Les puissances absorbées par les appareils TEAM sont données dans le tableau II.

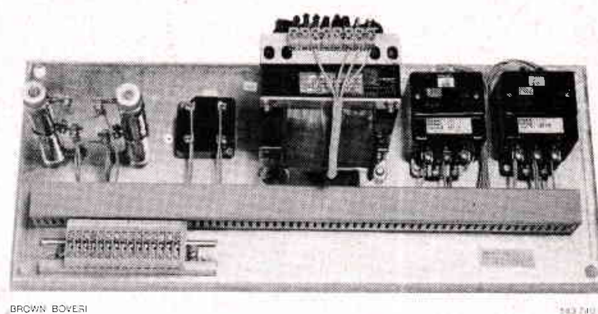


Fig. 7. – Dispositif d'alimentation pour enroulement de champ destiné aux appareils TEAM-50 et TEAM-100

(Les deux appareils des figures 7 et 8 forment une unité dans le TEAM-200.)

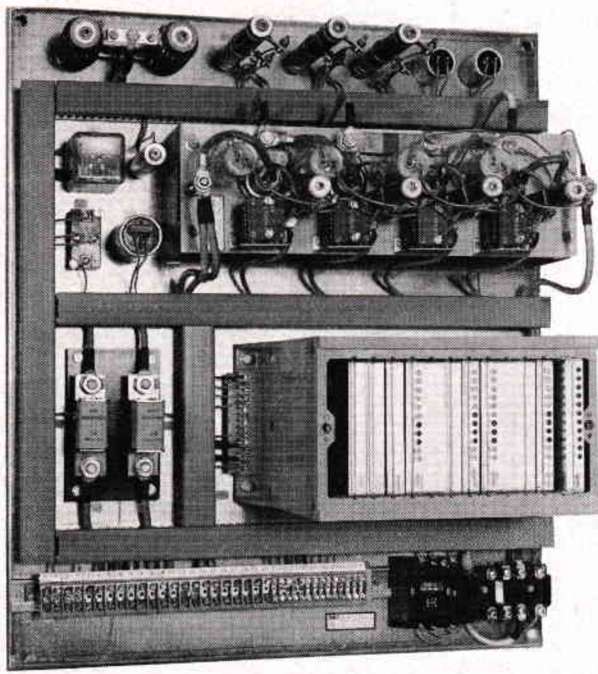

BROWN BOVERI 143742 I

Fig. 8. – Plaque de base complète TEAM pour les appareils d'alimentation TEAM-6 à TEAM-100

Pour les types TEAM-6 à TEAM-100, les dimensions des plaques de base atteignent 550 × 650 × 300 mm, avec un poids total de 29 kg. Les dimensions des plaques, destinées seulement aux appareils TEAM-50 et TEAM-100, sont 550 × 220 × 210 mm, avec un poids de 13 kg.

La structure de la plus grande unité, TEAM-200, destinée au moteur Minertia JKMM-200SR, est la même que celle des appareils mentionnés ci-dessus; toutefois, l'appareil électronique de base et l'unité fournissant le courant de l'enroulement de champ sont montés sur une plaque de 550 × 1050 × 350 mm et d'un poids total de 60 kg.

Toutes les plaques sont appropriées au maximum pour être montées dans une armoire et peuvent être facilement fixées avec quelques boulons; cependant, elles doivent être montées verticalement, c'est-à-dire avec réglette à bornes vers le bas.

Les bobines d'inductance nécessaires à la limitation du courant de circulation sont montées séparément, mais il faut veiller à ce que la ventilation soit suffisante. Le dispositif de commande à contacteurs extérieur, nécessaire, ne doit pas être monté sur la plaque comportant la partie électronique.

Fonctionnement et caractéristiques électriques

Si, lors de la phase d'accélération, on admet un courant de moteur supérieur au courant nominal (au maximum 10 fois), on peut atteindre des temps de démarrage extrêmement courts avec les moteurs Minertia. C'est pourquoi les organes de réglage TEAM sont dimensionnés pour une surcharge maximale de dix fois, de courtes durées (voir les tableaux III et IV). Lorsque la valeur de consigne varie, on doit pouvoir disposer du courant maximal aussi rapidement que possible. Les courts temps de démarrage exigés dépendent du temps mort (valeur moyenne pour TEAM: 5 ms) et du temps d'accroissement du courant (15 ms pour TEAM).

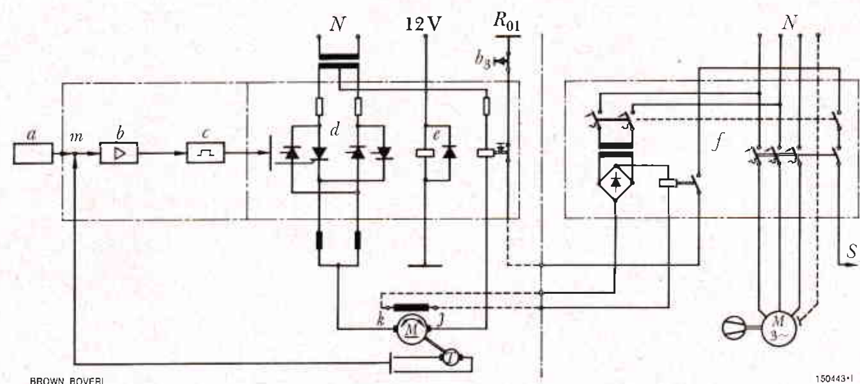


Fig. 9. – Schéma de principe d'un servo-mécanisme avec moteurs Minertia et appareils d'alimentation TEAM

a = valeur de consigne provenant d'une source extérieure pour *n* (commande pour usinage continu, par exemple)
b = amplificateur de réglage pour *n*
b_3 = secours
c = dispositif de commande de gâchettes
d = convertisseur statique
e = blocage du régulateur
f = dispositif d'alimentation pour enroulement de champ (à partir de JKMM-50SR)
j, *k* = enroulement de champ
M = moteurs Minertia
$M_{3\sim}$ = moteurs triphasés de ventilateurs
m = point de mixage (comparaison des valeurs de consigne et instantanée)
N = réseau
R_{01} = tension de commande
S = commande des contacteurs
T = dynamo tachymétrique

On utilise exclusivement des plaquettes et appareils normalisés de la technique électronique Brown Boveri.

Le fonctionnement des appareils d'alimentation TEAM est le suivant (fig. 9):

La différence entre la valeur de consigne externe *a* et la valeur instantanée fournie par la dynamo tachymétrique *T* est formée au point de mixage *m* et ramenée à un niveau approprié; ensuite, la grandeur réglante est amplifiée par l'amplificateur de réglage *b* à gain élevé et envoyée par l'intermédiaire de la soupape de réglage dans le dispositif de commande de gâchettes *c*, qui fournit aux thyristors *d* les impulsions correspondantes. Ces derniers s'amorcent selon l'ordre des impulsions et fournissent le courant nécessaire à l'enroulement d'induit du moteur Minertia *M*. Le circuit de réglage se ferme par le circuit de réaction (dynamo tachymétrique *T*).

Amplificateur push-pull à courant continu

L'amplificateur push-pull, résistant aux courts-circuits et pourvu d'emplacements pour circuits de protection, est un amplificateur linéaire à courant continu transistorisé. Il travaille avec un gain élevé selon le principe de l'amplificateur différentiel et possède une barre de masse qui le traverse de part en part; les tensions d'entrée et de sortie sont rapportées à cette barre.

La grandeur caractéristique de l'amplificateur push-pull est le rapport de la tension de sortie au courant d'entrée, tandis que l'amplification en tension, donnée usuellement, dépend de la résistance d'entrée. Celle-ci se compose de la résistance additionnelle choisie et de la résistance non linéaire base-émetteur de l'étage précédent.

Les deux entrées de l'amplificateur sont sorties et directement accessibles. La chute de tension due au courant de base de repos des transistors d'entrée est très petite, de sorte que le potentiel des entrées par rapport à la masse n'est que de quelques millivolts.

L'adaptateur d'impédance a une liaison fixe avec la sortie de l'amplificateur; cette sortie est en opposition de phase et résiste aux courts-circuits dans le domaine de tension de -24 à $+24$ V. La sortie, de même phase, a une résistance élevée et ne doit recevoir une résistance de charge que si l'on utilise un adaptateur d'impédance intermédiaire ($\leqslant 1$ MΩ) et que l'on tient compte de son courant de sortie.

La réponse harmonique de l'amplificateur est compensée de telle façon que l'amplificateur reste stable dans un couplage quelconque P, PI ou I.

La réponse en temps exigée pour la régulation et le calcul est ajustée par le soudage de résistances et condensateurs aux points prévus à cet effet.

Dans le cas de l'amplificateur push-pull à courant continu mentionné, on doit tenir compte des caractéristiques de service suivantes:

Tension d'alimentation: $\pm$ 24 V $\pm$ 2 %
Puissance absorbée: 750 mW

Dispositifs de commande de gâchettes

Les dispositifs de commande de gâchettes transistorisés, monophasés, utilisés, comprennent chacun une source d'alimentation qui fournit des tensions stabilisées de $\pm$ 24 V et des tensions de polarisation de $\pm$ 6 V. Cette source alimente le dispositif de commande de gâchettes et d'autres circuits tels que les régulateurs et les potentiomètres de valeurs de consigne (max. 10 mA).

La caractéristique de commande (tension de sortie de l'organe de commande en fonction de la tension de commande) est linéaire et dans une large mesure indépendante des variations de la tension de réseau. Le domaine de commande peut être limité dans les deux sens à l'aide de résistances ajustables de l'extérieur.

Les caractéristiques de service du dispositif de commande de gâchettes décrit sont les suivantes:

Alimentation	max. 380 V, monophasée, domaine de fréquence 48 à 52 Hz ou 57 à 63 Hz
Courant absorbé	0,105 A; puissance dissipée à la charge nominale: 24 W

Convertisseurs statiques

Dans la commande continue, pour l'inversion du sens de courant et des polarités, deux convertisseurs statiques avec au total quatre thyristors sont nécessaires. Les deux convertisseurs statiques sont couplés en antiparallèle et commandés en opposition de phase; ainsi, selon les besoins, les groupes travaillent en redresseurs pour l'accélération et en onduleur pour le freinage. L'amorçage des deux groupes se fait symétriquement, avec un angle de retard $\alpha = 90°$. Les convertisseurs statiques pour les appareils de TEAM-6 à TEAM-100 sont équipés des groupes de thyristors identiques, mais avec des tensions bloquées différentes, en fonction des différentes tensions d'induit. Les thyristors utilisés dans les appareils de la série TEAM-200 sont surdimensionnés à cause des courants élevés nécessaires.

Le freinage peut se faire de deux façons:

1. par le fonctionnement en onduleur, par de l'organe de réglage, ou

2. par une résistance de faible valeur, servant de charge au moteur Minertia (freinage rapide).

En même temps, le régulateur et par suite les thyristors sont bloqués comme lors de chaque arrêt et lors du freinage.

Inductances pour limitation de courants de circulation

Comme, à valeur moyenne égale, les valeurs instantanées des tensions de sortie des deux groupes redresseurs sont différentes, il apparaît, avec le couplage utilisé, des courants de circulation alternatifs. On les limite à l'aide de bobines d'inductance sans entrefer. Les organes de réglage sont dimensionnés pour des surcharges élevées, ce qui permet de dimensionner les bobines relativement petites (voir la note[1]).

Dispositif d'alimentation pour enroulement de champ

Les appareils TEAM-50 à TEAM-200 sont équipés d'une alimentation séparée pour l'enroulement de champ des moteurs Minertia (tableau III). L'enroulement de champ est aimenté par un transformateur dimensionné pour une tension primaire de 220, 380 ou 415 V, par l'intermédiaire d'un redresseur, sous 90 à 115 V selon le type de moteur.

Le dispositif d'alimentation pour enroulement de champ est équipé d'un déclencheur à minimum de courant pour la disparition de courant brusque et furtive; ce qui permet d'empêcher les moteurs de tourner. Le disjoncteur de protection pour le moteur du ventilateur est monté également sur la plaque de base du dispositif d'alimentation pour enroulement de champ.

Comme il est usuel dans les dispositifs de commande numériques, les embrayages magnétiques, les électro-vannes et les contacteurs, autrement dit les éléments de couplage inductifs, se trouvant sur la machine ou dans l'armoire de commande, doivent être déparasités. Les bobines d'inductance pour la limitation des courants de circulation et les transformateurs doivent être montés à une distance minimale dans l'air de 300 mm, distance comptée à partir du bord inférieur de la plaque-support de l'appareil.

Accessoires

Dynamo tachymétrique

Pour la formation de la valeur instantanée, on utilise une dynamo tachymétrique, couplée directement à l'arbre du moteur Minertia du côté opposé à l'entraînement, avec une grande précision de centrage. Cette dynamo tachymétrique avec 40 V/1000 tr/min se distingue par un faible moment

TABLEAU III

Caractéristiques électriques des appareils d'alimentation à thyristors

Type	P_d W	I_d A	I_{d1} A	U_d V	Alimentation d'enroul. de champ	Moteur correspondant
TEAM-6	290	6,3	63	46	–	JKMM-6 EM
TEAM-13	575	7,2	72	80	–	JKMM-13 EM
TEAM-25	1030	12,9	129	80	–	JKMM-25 EM
TEAM-50	2050	13,5	135	152	avec	JKMM-50 SR
TEAM-100	3900	32	200	122	avec	JKMM-100 SR
TEAM-200	7550	53	470	142	avec	JKMM-200 SR
TDAM	Organes de réglage à thyristors triphasés en couplage antiparallèle					JKMM-500 SR JKMM-1000 SR JKMM-2000 SR

P_d = puissance de sortie en régime permanent
I_d = courant de sortie en régime permanent
I_{d1} = courant maximal admissible pendant 50 ms avec un temps de repos de 1 s
U_d = tension continue nominale

TABLEAU IV

Transformateurs monophasés et servo-mécanismes correspondants

P_{dio} kW	U V	I A	P_t (kVA) pour une surcharge de courte durée de					Servo-mécanismes correspondants
			$1 \times I_d$	$3 \times I_d$	$5 \times I_d$	$7,5 \times I_d$	$10 \times I_d$	
0,44	2× 75	4,5	0,6	0,8	1,25	1,5	2	MM/TEAM-6
0,75	2×130	5,1	1	1,25	2	3	4	MM/TEAM-13
1,70	2×130	9,2	2,5	3	4	6	8	MM/TEAM-25
2,60	2×245	9,6	3,5	4	6	8	10	MM/TEAM-50
4,85	2×195	22,8	6,5	7	9	12	15	MM/TEAM-100
10,5	2×225	38	13,5	15	18	23	29	MM/TEAM-200

P_t = puissance de type
P_{dio} = puissance en courant continu
U = tension secondaire
I = courant secondaire
I_d = courant nominal de moteur

d'inertie propre, une sensibilité élevée, un taux d'harmoniques faible et une puissance absorbée réduite.

Transformateur de raccordement au réseau

Ces transformateurs sont monophasés; ils sont exécutés en groupes de couplage M/O avec pieds, pour montage vertical. La tension primaire étant de 220, 380 ou 415 V, les tensions secondaires sont adaptées aux moteurs utilisés, la surcharge en courant de courtes durées pouvant être plusieurs fois supérieure au courant nominal.

Le tableau IV donne les caractéristiques des transformateurs de la série MM/TEAM. Le choix se fait surtout pour un courant de courte durée égal au quintuple du courant nominal (valeur moyenne), suffisant dans la plupart des cas; mais au cas où une rare surcharge (pendant une alternance) de dix fois le courant nominal apparaîtrait, elle serait supportée par le transformateur. Toutefois, si des surcharges de six à dix fois le courant nominal (de courte durée seulement) devaient souvent apparaître, il est recommandé de choisir des transformateurs plus grands.

(A. G.) ADELBERT GAPP

Dispositifs d'alimentation à thyristors pour petits équipements d'entraînement

621.382.233:621.313.13-181.4

A cause de la rapide extension de l'automatisation, les appareils destinés à l'alimentation et à la régulation des équipements d'entraînement à courant continu acquièrent une importance de plus en plus grande. C'est pourquoi l'auteur donne, dans le présent article, un aperçu sur les dispositifs d'alimentation à thyristors mis au point par la Société Brown Boveri pour ce domaine d'application et livrables pour les puissances comprises entre 1 et 250 kW et décrit brièvement leurs caractéristiques.

Domaines d'application

L'industrie a un besoin croissant d'équipements d'entraînement avec une régulation de vitesse rapide, précise et s'étendant sur un large domaine. Le moteur à courant continu, à excitation séparée et à régulation électronique a fait ses preuves depuis de nombreuses années dans ce domaine et permettent en combinaison avec les convertisseurs à thyristors de résoudre aujourd'hui presque tous les problèmes d'entraînement, dans tout le domaine de puissance [1]. Les convertisseurs statiques à thyristors se distinguent généralement par leurs excellentes propriétés de réglage, leur bon rendement, leur poids réduit et leur faible encombrement. De plus, ils ne possèdent aucune partie sujette à l'usure, ils travaillent dans un large domaine de température et permettent un stockage simple des pièces de rechange, grâce à une interchangeabilité facile des différents éléments. La Société Brown Boveri offre aujourd'hui des appareils d'alimentation à thyristors prêts à être connectés, dans un domaine de puissance s'étendant de 1 à 250 kW. Les domaines d'application principaux sont: les machines-outils, les machines à papier et les machines d'imprimerie, les dispositifs d'entraînement pour ascenseurs et ponts roulants, ainsi que les calandres à caoutchouc et à matières plastiques, etc. L'étude et la mise en service des dispositifs d'entraînement alimentés par convertisseurs statiques à thyristors prêts à être connectés demandent peu de dépenses.

Aperçu des types d'appareils

Les appareils d'alimentation à thyristors se composent en substance d'un redresseur à thyristors commandé, du dispositif de régulation électronique correspondant et des dispositifs de protection contre surtensions et surintensités. En raison de leurs possibilités d'applications universelles, ils sont demandés avec des couplages différents pour un large domaine de puissance. Ceci explique l'extraordinaire diversité des produits offerts sur le marché aujourd'hui. Pour obtenir une fabrication rationnelle, le fabricant s'efforce de faire un choix parmi les nombreuses variantes possibles, permettant de répondre le mieux aux besoins du marché. Dans ce qui suit, nous allons décrire l'assortiment offert par la Société Brown Boveri sans donner des détails techniques sur les appareils d'alimentation. Cet aperçu doit avant tout aider l'utilisateur, lors de l'étude du projet, à choisir au mieux les appareils d'alimentation à thyristors convenant aux données de l'installation en question. L'assortiment des appareils d'alimentation à thyristors comprend:

- petit régulateur Veritron
- série de fabrication Veritron GCB
- série de fabrication Veritron M
- série de fabrication P
- Unitrol

Petit régulateur Veritron®

Le petit régulateur Veritron est monté dans un étage normalisé 3E de la technique électronique Brown Boveri [2] (fig. 1). La largeur de cet étage atteint 19 pouces (482 mm). Tous les éléments fonctionnels utilisés sont débrochables (plaquettes), de sorte qu'on peut les sortir et les remplacer facilement lors de travaux de contrôle ou lors de perturbations.

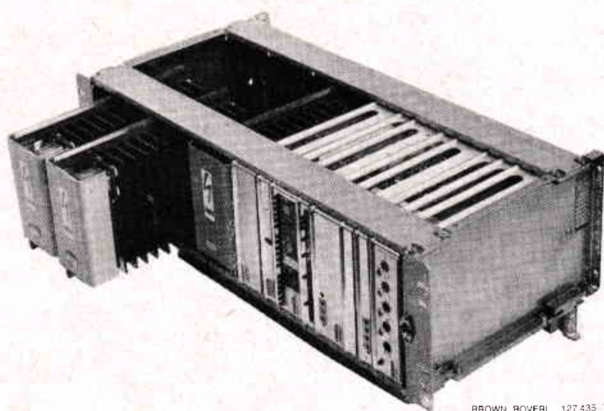


Fig. 1. – Régulateur Veritron, monté dans un étage normalisé de la technique électronique Brown Boveri

Lorsque le petit régulateur Veritron est monté dans un cadre pivotant, la connexion des fils se fait par fiches, tandis que dans le montage séparé, elle se fait au contraire au moyen de bornes. Comme appareil indépendant, le petit régulateur peut être livré avec un boîtier du type de protection P 01. Le petit régulateur Veritron est un appareil à thyristors de haute qualité et permet de résoudre pratiquement tous les problèmes de régulation et d'entraînement jusqu'à une puissance d'environ 10 kW. L'alimentation de l'appareil se fait normalement par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé. En couplage en pont, la connexion directe avec des réseaux à 380 V peut se faire au moyen d'une bobine d'inductance, si la tension continue nominale du circuit d'utilisation n'exige aucune adaptation de la tension alternative. Selon la puissance de sortie et le but d'application, l'organe de réglage monophasé est monté en couplage à deux alternances à point médian ou bien en pont semi-commandé. Le couplage à deux alternances à point médian permet d'inverser la tension aux bornes à courant continu, ce qui rend possible par exemple la désexcitation rapide des alternateurs. Le pont semi-commandé ne permet aucune inversion de tension, mais en revanche il fournit une tension continue deux fois plus élevée pour la même tension alternative et le même courant continu.

Avantages du petit régulateur Veritron®

- Précision de régulation élevée et stabilité thermique
- insensibilité aux variations de la tension de réseau
- grandes possibilités de réglage de toutes les valeurs limites exigées et de la caractéristique de régulation optimale à l'aide de potentiomètres et de fiches incorporés.

TABLEAU I

Régulateur Veritron®: caractéristiques électriques pour alimentation directe de moteurs à courant continu

Couplage	Tension d'alimentation U_{v0} V	Tension continue nominale U_{d1} V	Courant continu nominal I_{d1}[1] A	Puissance nominale en courant continu P_{d1}[1] kW
à deux alternances à point médian	2 × 190	140	6,3 16,5 45	0,88 2,3 6,3
en pont semi-commandé	220	160	6,3 16,5 45	1,0 2,65 7,2
	380	280	6,3 16,5 45	1,77 4,6 12,6

[1] Valeurs recommandées

TABLEAU II

Régulateur Veritron®: caractéristiques électriques pour l'alimentation de l'enroulement de champ de moteurs à courant continu

Couplage	Tension d'alimentation U_{v0} V	Tension continue nominale U_{d1} V	Courant continu nominal I_{d1}[1] A	Puissance nominale en courant continu P_{d1}[1] kW
à deux alternances à point médian	2 × 190	165	6,3 16,5 45	1,0 2,7 7,4
en pont semi-commandé	220	190	6,3 16,5 45	1,2 3,1 8,6
	380	330	6,3 16,5 45	2,1 5,5 14,9

[1] Valeurs recommandées

Caractéristiques techniques

Puissance de sortie:	jusqu'environ 10 kW
Domaine de réglage de la vitesse de rotation:	jusqu'à 1:100
Ecart de vitesse, statique, entre la marche à vide et la marche à pleine charge:	< ± 0,5 %, avec des dépenses supplémentaires jusqu'à ± 0,1% (rapporté à la vitesse de rotation nominale)

Caractéristiques électriques pour l'alimentation directe et l'alimentation de l'enroulement de champ de moteurs à courant continu (voir tableaux I et II).

Appareils d'alimentation à thyristors Veritron de la série GCB

Les Veritron de la série GCB sont des appareils d'alimentation prêts à être connectés, en exécution compacte, montés sur une plaque en tôle [3] (fig. 2). Cette plaque supporte les éléments lourds tels que la bobine d'inductance pour la connexion directe au réseau et le transformateur pour la partie à courant fort. Les plaques isolantes, situées au-dessus, comportent la partie électronique, la partie protection et les dispositifs pour l'alimentation de l'enroulement de champ des moteurs à courant continu. Pour les grandes quantités, les petits appareils d'alimentation sont au besoin construits en modules débrochables ou en étages de 19 pouces de large [2] (série RCB). Tous les appareils étant montés en couplage en pont monophasé, semi-commandé, sont livrés pour des courants nominaux atteignant 60 A. Tous les appareils sont à refroidissement naturel par air. En raison de leur couplage, ils sont utilisables seulement avec des polarités déterminées, donc appropriés surtout aux dispositifs d'entraînement ne changeant pas de sens, ainsi qu'à l'alimentation des électro-aimants, des éléments chauffants, etc. [4]. Pour les dispositifs d'entraînement qui exigent une grande constance de la vitesse de rotation, on prévoit surtout une régulation par dynamo tachymétrique. Lorsque les exigences sont modérées, une régulation de tension convient dans certaines circonstances (sans dynamo tachymétrique); pour cette régulation, une tension supplémentaire, proportionnelle au courant, est introduite dans le circuit de régulation, elle compense la chute de tension d'induit apparaissant en charge (compensation $I \times R$). Dans les deux variantes, les régulateurs sont protégés pour des conditions d'entraînement moyennes.

La tension de sortie des ponts semi-commandés ne peut normalement pas être réduite jusqu'à zéro. La

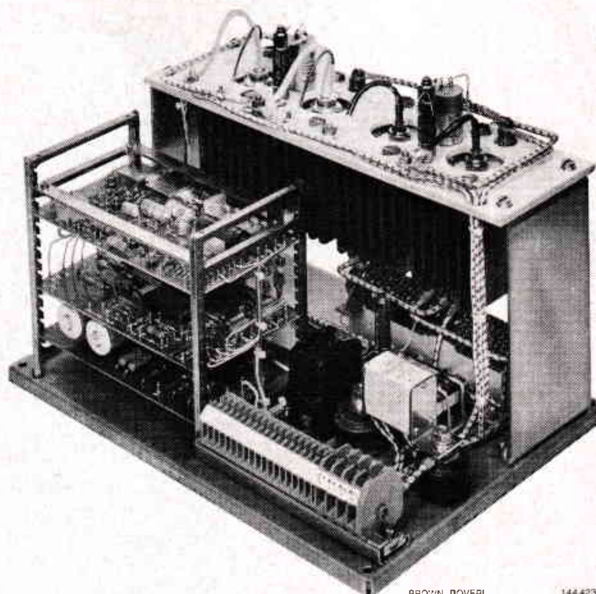


Fig. 2. – Appareil d'alimentation à thyristors Veritron®, type GCB 05

Courant nominal: 35 A
Dimensions: 396 × 280 × 300 mm

limite inférieure du domaine de régulation dépend du genre du circuit d'utilisation et du lissage du courant continu. Pour les circuits d'utilisation ayant une grande constante de temps (par exemple électro-aimants, enroulements de champ), la limite inférieure est située plus bas que dans le cas d'un mauvais lissage.

Avantages de cette série

- Les appareils sont prêts à être connectés, ils comprennent les dispositifs de commande et de régulation électroniques
- le dispositif de commande par impulsions et le dispositif de régulation sont prêts à fonctionner et ajustés pour des conditions moyennes
- un poids faible et un volume très petit.

Caractéristiques techniques

Puissance de sortie:	jusqu'à 17 kW
Domaine de régulation de la vitesse de rotation	1:20 1:50 pour un bon lissage

TABLEAU III

Caractéristiques électriques des Veritron® de la série GCB

Appareils d'alimentation type	Tension d'alimentation U_{v0} V	Tension continue nominale U_{d1} V	Courant continu nominal I_{d1} [1] A	Puissance nominale en courant continu P_{d1} [1] kW
GCB 03	285	220	12	2,6
GCB 04	285	220	20	4,4
RCB 04	380	280	20	5,6
GCB 05	220 285 380	160 220 280	35	5,6 7,7 9,8
GCB 06	220 285 380	160 220 280	60	9,6 13,2 16,8

[1] Valeurs recommandées

Ecart de vitesse, statique, entre la marche à vide et la marche à pleine charge: $< \pm 1\%$ pour régulation de vitesse par dynamo tachymétrique
$\pm 3\%$ à 5% pour régulation de tension avec compensation $I \times R$ rapportée à la vitesse de rotation nominale

Domaine de déphasage de l'impulsion de commande: 30 à 168 °él.

Pour les caractéristiques, voir le tableau III.

Appareils d'alimentation à thyristors des séries Veritron® M et P

Les convertisseurs des séries Veritron M et P sont des appareils montés sur châssis (fig. 3). Ils couvrent un domaine de puissance de 5 à 200 kW environ. Les appareils de la série M, à refroidissement naturel, suffisent jusqu'à environ 45 kW, tandis qu'on utilise pour des puissances plus élevées les appareils de la série P, livrables avec ou sans ventilateur. Les appareils d'alimentation prêts à être connectés des séries M et P se composent d'une partie à courant fort (convertisseur statique), d'une partie de commande (électronique) et des dispositifs de protection contre les surtensions et les surintensités. En exécution normale, ils constituent une unité éprouvée; dans des cas particuliers, la partie de commande et les dispositifs de protection peuvent aussi être livrés séparément. Les appareils d'alimentation sont accessibles par la face frontale. Le redresseur est constitué par plusieurs plaques de matière moulée et de tôle, disposées les unes au-dessus des autres et boulonnées sur deux parois latérales. Trois ou quatre radiateurs sont fixés, l'un à côté de l'autre, sur une plaque en matière moulée. La largeur totale d'un élément de construction atteint 360 mm, de sorte qu'il est possible de monter deux convertisseurs statiques l'un à côté de l'autre dans un panneau normalisé de 800 mm de large.

Les appareils Veritron de la série M et P permettent de réaliser tous les couplages redresseurs usuels. C'est pourquoi, ils peuvent être utilisés non seulement pour les dispositifs d'entraînement continus et réversibles, mais encore comme régleurs de courant alternatif triphasé ou monophasé. Les appareils avec les couplages les plus demandés sont avantagés en ce qui concerne le stockage et permettent par suite des délais de livraison particulièrement courts.

La partie électronique est en exécution modulaire de la technique électronique Brown Boveri [2]. Elle peut être montée dans un étage en matière plastique (fig. 4) comportant 15 parties et basculant vers le bas, ou encore dans un cadre pivotant. Les bobines pour la connexion directe au réseau et pour couplage antiparallèle ne sont pas incorporées aux appareils d'alimentation et doivent, le cas échéant, être commandées en tant qu'accessoires.

Avantages de ces séries de fabrication

- **Livrables prêtes à être connectées, donc petits frais d'étude et de mise en service**
- **disponibles dans tous les couplages et par suite utilisables universellement**
- **partie électronique de grande qualité technique, par suite appropriée à tous les problèmes d'entraînement pouvant se présenter**
- **il est possible de monter deux unités, l'une à côté de l'autre, dans un panneau normalisé de 800 mm de large.**

Caractéristiques techniques

Puissance de sortie: Veritron M: 5 à 45 kW
Veritron P: 30 à 200 kW

Domaine de régulation de la vitesse de rotation: jusqu'à 1 : 100

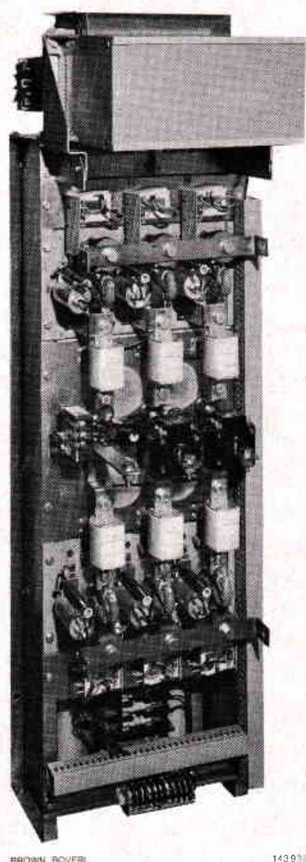


Fig. 3. – Appareil d'alimentation à thyristors Veritron®, type PSD 18 avec ventilateur et étage d'électronique incorporé

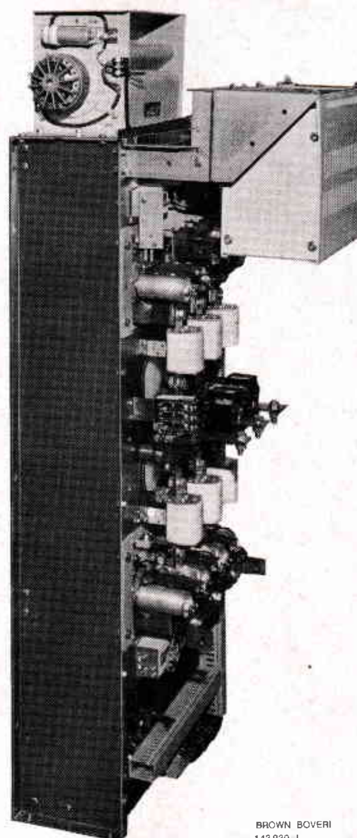


Fig. 4. – Appareil d'alimentation à thyristors Veritron®, type SPD 18 avec étage d'électronique basculé vers le bas

TABLEAU IV

Caractéristiques électriques de Veritron®, série M

Appareils d'alimentation type	Couplage	Tension d'alimentation U_{v0} V	Tension continue nominale U_{d1} V	Courant continu nominal I_{d1} [1] A	Puissance nominale en courant continu P_{d1} [1] kW
MCB 04 MCB 05 MCB 06	pont monophasé semicommandé	220	160	35 55 70	5,6 8,8 11,2
MCK 24 MCK 25 MCK 26	pont triphasé semicommandé avec diode de shuntage	380	440	50 75 105	22 33 46,2
MSB 04 MSB 05 MSB 06	pont monophasé entièrement commandé	220	160	35 55 70	5,6 8,8 11,2
MSD 14 MSD 15 MSD 16	pont triphasé entièrement commandé	380	440	45 70 100	19,8 30,8 44

[1] Valeurs recommandées

TABLEAU V

Caractéristiques électriques de Veritron®, série P

Appareil d'alimentation type	Couplage	Refroidissement	Tension d'alimentation U_{v0} V	Tension continue nominale U_{d1} V	Courant continu nominal I_{d1}[1] A	Puissance nominale en courant continu P_{d1}[1] kW
PSD 16 PSD 17 PSD 18	pont triphasé entièrement commandé	naturel	380	440	110 175 195	48,4 77 86
PSD 16 PSD 17 PSD 18	pont triphasé entièrement commandé	forcé	380	440	220 340 465	97 150 205
PSB 06 PSB 07 PSB 08	pont monophasé entièrement commandé	naturel	220	160	75 125 145	12 20 23,2
PSB 06 PSB 07 PSB 08	pont monophasé entièrement commandé	forcé	220	160	150 235 330	24 37,5 53
PCD 16 PCD 17 PCD 18	pont triphasé semi-commandé	naturel	380	440	110 175 195	48,4 77 86
PCD 16 PCD 17 PCD 18	pont triphasé semi-commandé	forcé	380	440	220 340 465	97 150 205
PCB 06 PCB 07 PCB 08	pont monophasé semi-commandé	naturel	220	160	75 125 145	12 20 23,2
PCB 06 PCB 07 PCB 08	pont monophasé semi-commandé	forcé	220	160	150 235 330	24 37,5 53

[1] Valeurs recommandées

Ecart de vitesse de rotation, statique, entre la marche à vide et la marche à pleine charge:	< ± 0,5 %, pour une dépense plus élevé jusqu'à ± 0,1% (rapporté à la vitesse de rotation nominale)

Pour les caractéristiques électriques, voir les tableaux IV et V.

Unitrol®

Selon le type, la puissance et l'utilisation, l'Unitrol occupe un à deux étages normalisés 3 E de la technique Brown Boveri. De plus, il peut être monté dans le boîtier Elnorm (fig. 5) dont la plaque frontale permet de monter ces appareils dans les tableaux de commande. Le dispositif de comparaison des valeurs de consigne et instantanée, le circuit de protection, le dispositif de commande de gâchettes et l'organe de réglage se trouvent dans des plaquettes débrochables. L'Unitrol est exclusivement à refroidissement naturel. Les types 3312 et 4312 sont des appareils d'alimentation triphasés et peuvent être connectés aux réseaux de courant alternatif jusqu'à 380 V directement ou par l'intermédiaire d'un transformateur. Cependant, pour le raccordement direct, on utilise en général des bobines d'inductances insérées entre les appareils et le réseau, parce qu'un minimum de réactance de commutation est nécessaire au fonctionnement correct du convertisseur statique.

Les six thyristors sont commandés par un dispositif de commande de gâchettes fournissant trois impulsions; à chaque instant, deux thyristors – un par moitié de pont – sont amorcés simultanément. Ce

dispositif de commande simple diminue beaucoup le prix du dispositif de traitement des impulsions de commande, mais il limite en même temps le domaine de déphasage de l'impulsion. En comparaison d'un pont triphasé commandé par six impulsions, les thyristors ne peuvent donc, au point de vue de la tension, être utilisés qu'à 75%. Pour une tension d'alimentation de 380 V, la tension continue idéale à vide maximale atteint 385 V, de sorte que l'on obtient, pour les cas d'application normaux et le fonctionnement à polarité fixe, une tension de moteur d'environ 330 V.

Avantages de l'Unitrol

- Possibilité d'utilisation illimitée comme régulateur de vitesse et de tension
- accessibilité facile des différentes parties protégées contre les secousses et fabriquées en exécution compacte
- possibilité de réglage facile de la caractéristique de régulation
- possibilité de montage dans des panneaux et possibilité d'utilisation comme appareil indépendant.

Caractéristiques techniques pour l'utilisation comme régulateurs de vitesse de rotation

Puissance de sortie: jusqu'à 30 kW

TABLEAU VI

Unitrol®: caractéristiques électriques

Unitrol® type	Tension d'alimentation U_{v0} V	Tension continue nominale U_{di} V	Courant continu nominal I_{di} [1] A	Puissance nominale en courant continu P_{di} [1] kW
3312	380	330	30	9,9
4312	380	330	90	29,7

[1] Valeurs recommandées

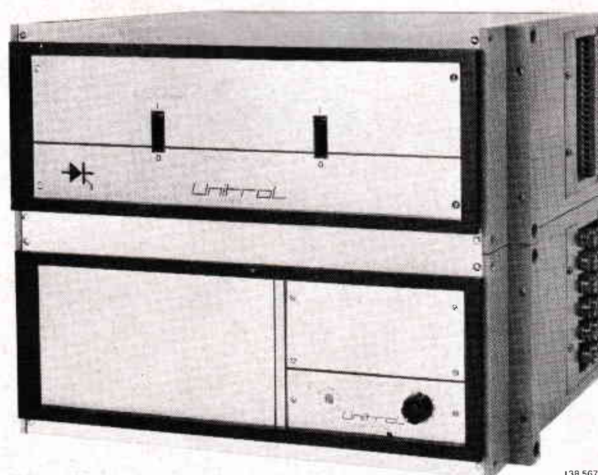


Fig. 5. – Unitrol®, type 4312

Courant nominal: 90 A
Tension continue: 0 à 385 V

Domaine de régulation de la vitesse de rotation: 1:10

Ecart de vitesse de rotation, statique, entre la marche à vide et la marche à pleine charge: < ±1% (rapporté à la vitesse de rotation nominale)

Domaine de déphasage des impulsions: 0 à 120 °él.

Pour les caractéristiques techniques, voir le tableau VI.

(A.G.) GEORG WALKER

Bibliographie

[1] E. Alzinger, T. Klasen: Veritron®, un dispositif d'alimentation à thyristors pour équipements d'entraînement réglés. *Rev. Brown Boveri*, vol. 54 (1967), n° 5/6, p. 233 à 240.

[2] Th. Ernst: Les principes ayant présidé à la conception des équipements Brown Boveri de réglage et de commande électroniques. *Rev. Brown Boveri*, vol. 47 (1960), n° 10/11, p. 670 à 675.

[3] R. Philips et F. Kramer: Veritron®-Stromrichtergeräte. *BBC Nachr.*, vol. 50 (1968), n° 3, p. 144 à 147.

[4] F. Kramer: Anwendung von Veritron®-Stromrichtergeräten. *BBC Nachr.*, vol. 50 (1968), n° 3, p. 148 à 152.

L'entraînement électrique et la commande des trains-Minirail

625.312-83

Après un bref exposé sur le système de transport par trains-Minirail, les auteurs décrivent, dans cet article, les équipements d'entraînement électriques et les dispositifs de commande livrés par la Société Brown Boveri pour ce genre d'installation. Ils expliquent la fonction de la commande automatique et manuelle de ces trains et donnent pour terminer quelques-uns des résultats obtenus en exploitation.

Système de transport du type «Minirail»

Les trains-Minirail, comme ils ont été conçus pour l'Exposition nationale suisse de 1964 à Lausanne par la Fabrique de machines Habegger à Thoune (Suisse), constituent un moyen de transport attrayant qui raccourcit aux visiteurs d'expositions, de parcs d'attraction vastes ou de fabriques, les parcours fatigants.

A la suite du grand succès des trains-Minirail (fig. 1) à l'Exposition nationale suisse, les trains munis d'équipements d'entraînement et de commande Brown Boveri sont fort appréciés dans les parcs d'attraction de Blackpool (Angleterre), de Sacramento (USA), de Korakuen (Japon) et de Fuji-Highland (Japon). De même, les visiteurs de la Chocolaterie Hershey (USA) utilisent aujourd'hui ces petits trains pour se déplacer sur les vastes terrains de la fabrique.

Comme le montre la figure 2, pour l'exposition mondiale de Montréal (Canada) on avait construit trois circuits fermés pour trains-Minirail qui continuaient de servir en 1968 comme chemins de fer d'attraction. Les deux plus petits, sur chacun desquels circulaient vingt-quatre trains de l'Exposition nationale suisse de Lausanne (fig. 1), avaient chacun une longueur d'environ 2 km. Nous allons parler ci-dessous de la troisième installation afin de pouvoir décrire, à l'aide d'un exemple concret, l'équipement d'entraînement et de commande des trains-Minirail.

La voie est formée par deux profilés en double T, montés l'un à côté de l'autre sur des supports (fig. 3). Elle a une longueur d'environ 7 km et un écartement de 550 mm. Sur ce circuit circulent 32 trains de neuf voitures. Le poids d'un train complet avec



Fig. 1. – Petit Minirail, type Lausanne, devant le pavillon suisse à l'exposition mondiale de 1967 à Montréal (Canada)

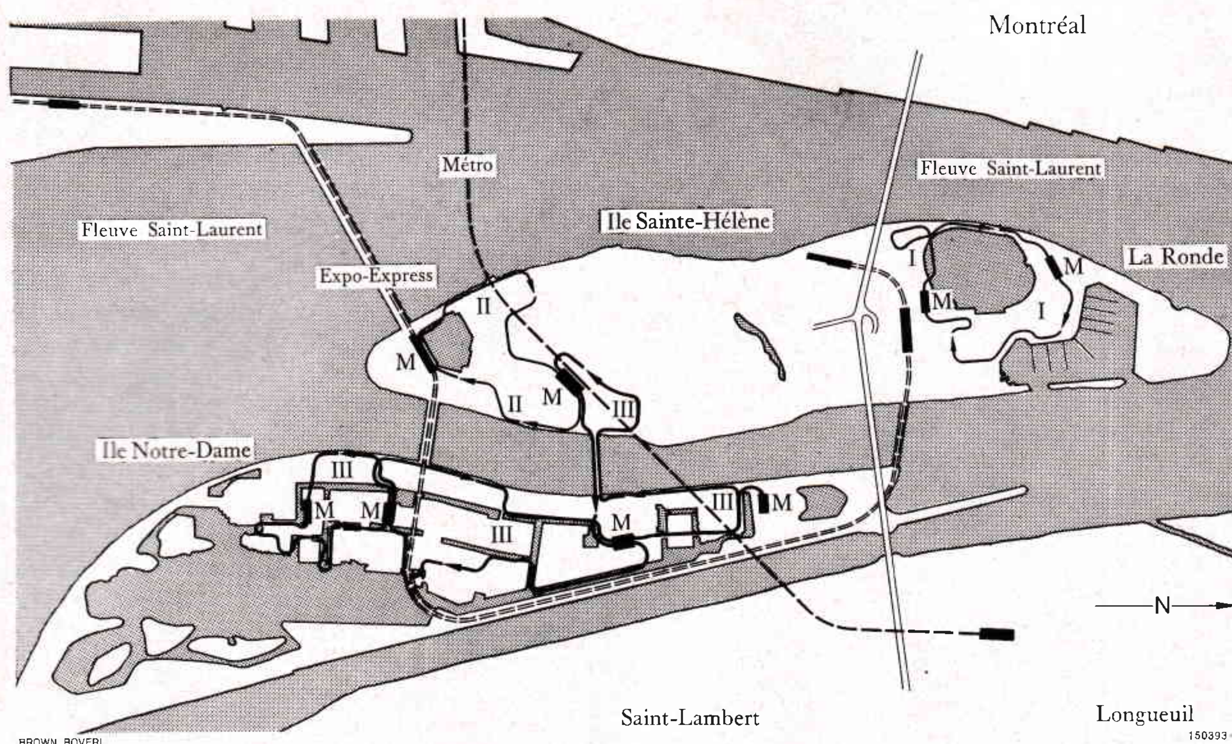


Fig. 2. – Plan de l'exposition mondiale de 1967 à Montréal (Canada)

I, II = petits circuits du système Minirail, type Lausanne, chacun d'une longueur d'environ 2 km
III = grand circuit, d'une longueur d'environ 7 km
M = gares du système Minirail

ses 102 places assises occupées est de l'ordre de vingt tonnes.

Les trains montés sur pneus en caoutchouc gonflés à l'azote circulent à une vitesse maximale de 4,5 m/s ou d'environ 16 km/h et doivent monter des rampes allant jusqu'à 100‰.

Entraînement électrique et commande

Entre toutes les deux voitures se trouve un bogie avec un moteur d'entraînement à courant continu. Comme le montre la figure 4, chaque moteur entraîne une paire de roues par l'intermédiaire de six



Fig. 3. – Grand train-Minirail construit pour l'exposition mondiale de 1967 de Montréal (Canada)

courroies trapézoïdales et d'un système à vis sans fin et à différentiel. A chaque moteur est adjoint un frein à ressorts à desserrage électromagnétique du côté opposé à l'entraînement. Les bogies des voitures de tête et de queue n'ont pas de moteurs d'entraînement.

A l'exception du système de conduite et des freins à ressorts à desserrage électromagnétique, la totalité des équipements électriques des trains-Minirail mentionnés ont été livrés par la Société Brown Boveri. La figure 5 montre le schéma de principe d'un train de l'installation décrite dans le présent article.

Le système Ward-Leonard a été préféré à un dispositif d'alimentation statique à cause des courtes interruptions de tensions qui apparaissent souvent en service et qui sont dues aux points de séparation entre les différentes sections d'alimentation des barres de contact et aux sauts de l'organe de prise de courant.

Le moteur asynchrone 1 (triphasé, 440 V, 60 Hz, 1760 tr/min, avec commutateur automatique de démarrage ⅄/△), qui forme avec la dynamo 2 un système monobloc, se trouve dans la voiture de tête. Il est alimenté par l'intermédiaire d'organes de prise de courant triphasés, glissant sur des barres de contact fixées latéralement sur la voie. Lors du passage aux points de séparation des barres de contacts, le moteur est alimenté par une batterie de condensateurs; ainsi, les contacteurs et les dispositifs de régulation sont continuellement alimentés. De plus, la batterie de condensateurs fournit la puissance réactive. Une temporisation, différente pour chaque train, fait que, lors de la mise sous tension, la montée en vitesse de tous les convertisseurs ne se fait pas au même moment. La dynamo 2, qui est protégée, par un relais à maximum de courant, contre les courts-circuits, possède trois enroulements: un pour l'excitation séparée, un pour l'excitation inverse et un pour la suppression de la tension de rémanence. L'excitation inverse permet un arrêt électrique impeccable sur les pentes. Le troisième enroulement est nécessaire, car le groupe convertisseur continuant de tourner, lorsque le train est arrêté, aurait produit dans la génératrice une tension de rémanence agissant sur les circuits des moteurs de traction.

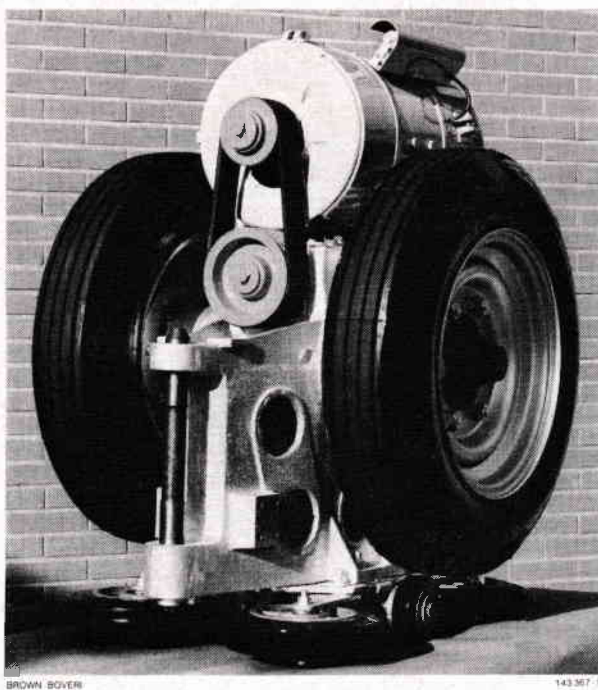


Fig. 4. – Bogie moteur avec son moteur de traction

La dynamo 2 alimente les huit moteurs de traction 3a, 3b, etc., d'un train, couplés en parallèle, avec une tension continue variable, de telle sorte que la vitesse du train peut être réglée en continu.

Chaque moteur est relié à la dynamo par son propre câble de courant principal et possède une résistance de réglage comprise dans le circuit de champ et fixée sur la carcasse, à l'extérieur; elle sert à rattraper les petits écarts de la caractéristique du moteur. Les inducteurs des moteurs sont alimentés en parallèle par une tension d'excitation de 110 V. L'armoire d'appareillage contient, pour chaque moteur, un shunt pour le courant principal et un interrupteur de protection. On peut prélever sur le shunt de courant principal une tension proportionnelle au courant d'induit et l'utiliser pour l'indication du courant de moteur concerné. Un appareil embrochable avec huit instruments permet de mesurer simultanément tous les courants de moteur d'un train. Les interrupteurs de protection des moteurs, pourvu d'un dispositif magnétique de déclenchement rapide, sont ajustés à une valeur égale au triple du courant nominal du moteur.

Les conditions de service, citées à la fin du paragraphe précédent, exigent des moteurs avec un degré de compoundage élevé. En couplage en parallèle, l'avantage de ceci est que l'on obtient en même temps une bonne répartition de courant. Lors du freinage, les moteurs de traction marchent en génératrices et renvoient de l'énergie électrique dans le réseau par l'intermédiaire du groupe convertisseur. Lors de la marche en génératrice, leur enroulement compound est court-circuité par des diodes couplées en parallèle, parce qu'autrement l'effet de freinage serait réduit beaucoup trop à cause d'un fort anticompoundage.

Les transformateurs 16, 17 et 18 (fig. 5) alimentent en énergie les dispositifs auxiliaires. Le trans-

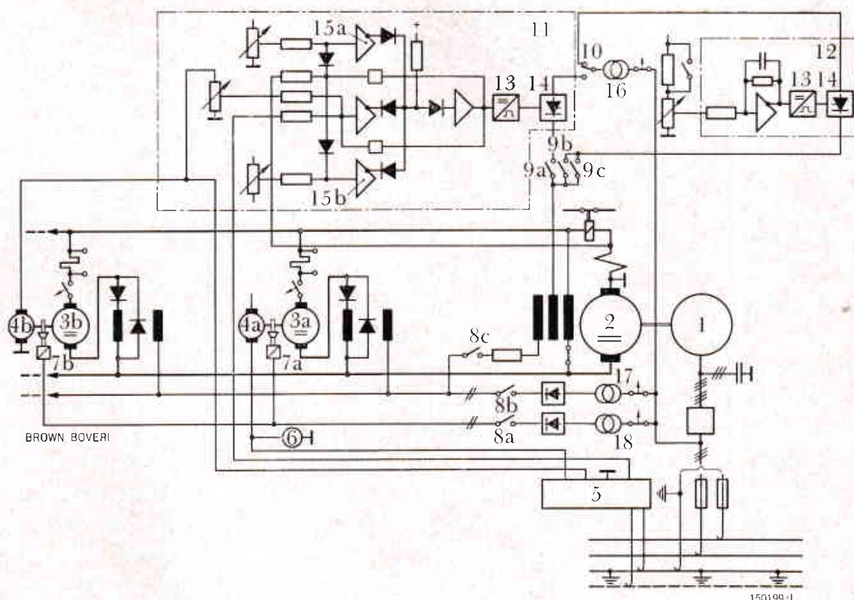


Fig. 5. – Schéma de principe du dispositif de commande et de régulation

1 = moteur asynchrone triphasé
2 = dynamo
3a, 3b = moteurs de traction
4a = dynamo tachymétrique pour indication et surveillance
4b = dynamo tachymétrique pour régulation et surveillance
5 = «autopilote» du système de conduite de train KL 167
6 = indicateur de vitesse du train
7a, 7b = freins
8a = contacteur pour le desserrage du frein
8b = contacteur pour l'excitation de moteur
8c = contacteur pour l'enroulement de freinage
9a = contacteur pour l'excitation de la dynamo en commande automatique
9b = contacteur pour l'excitation de la dynamo en commande manuelle (marche avant)
9c = contacteur pour l'excitation de la dynamo en commande manuelle (marche arrière)
10 = sélecteur du genre de service
11 = régulateur de vitesse du train
12 = régulateur Veritron pour commande manuelle
13 = dispositif de commande des gâchettes
14 = organe de réglage à thyristors
15a, 15b = amplificateurs auxiliaires
16 = transformateur pour le régulateur et le dispositif de commande
17 = transformateur pour l'excitation des moteurs de traction et l'excitation inverse pour la marche en génératrice
18 = transformateur pour l'excitation des freins à ressorts des moteurs

formateur 16 alimente, selon le genre de service, le régulateur ou le dispositif pour commande manuelle. Le second transformateur 17 alimente, par l'intermédiaire d'un redresseur, les enroulements de champ des moteurs de traction et l'enroulement d'excitation inverse de la génératrice. Le transformateur 18 fournit, par l'intermédiaire d'un redresseur, le courant d'excitation pour le desserrage des freins à ressorts.

L'installation complète de régulation et de commande se trouve dans une armoire d'appareillage abritée montée dans la voiture de tête. Dans la partie supérieure de l'armoire, sous un couvercle avec système de fermeture à clé à quatre pans, sont montés le dispositif de signalisation des perturbations, le sélecteur du genre de service, le bouton-poussoir pour la mise en marche du groupe convertisseur, le potentiomètre des valeurs de consigne pour la commande manuelle, l'indicateur de la vitesse et la fiche de prise de courant pour l'appareil servant à l'entretien.

Fonctionnement du système de commande automatique

Comme il est déjà mentionné, les rails de cette installation forment une boucle fermée. Les trente-deux trains-Minirail circulent automatiquement et ne sont commandés par le personnel de service que lors des manœuvres ou en cas de dérangement.

Comme complément aux équipements électriques d'entraînement et de commande livrés par la Société Brown Boveri, les installations Minirail possèdent pour la marche automatique des systèmes de conduite de train de la Firme Honegger Elektronik, Zollikerberg (Suisse). Ce système repose sur l'utilisation d'un rail de commande posé le long de la voie et divisé en tronçons d'égales longueurs. Des contacts glissants prélèvent sur ce rail une tension proportionnelle à la distance du train et la transmettent comme valeur de consigne au régulateur de vitesse 11 par l'intermédiaire de «l'autopilote» 5 (fig. 5) se

trouvant également dans les voitures de tête des trains. Les trains circulent automatiquement à la vitesse maximale possible et freinent lorsque leur distance devient inférieure à la distance de sécurité prescrite.

Les ordres de démarrage sont donnés à l'aide de boutons-poussoirs du système de conduite de train, se trouvant sur les quais. Des ordres de démarrage arrivant par les «autopilotes» dans les équipements d'entraînement des différents trains, entraînent d'abord l'excitation des enroulements de champ des moteurs de traction, un peu après le déclenchement des enroulements qui suppriment la tension de rémanence des génératrices, le desserrage des freins et la commutation des régulateurs de l'excitation inverse sur les enroulements inducteurs.

En marche, le régulateur de vitesse 11 (fig. 5) compare la valeur de consigne prescrite avec la valeur instantanée de la tension fournie par une dynamo tachymétrique 4b accouplée au moteur de traction 3b. La différence est amplifiée dans un amplificateur couplé comme régulateur PID et influence, par l'intermédiaire du dispositif de commande de gâchettes 13, l'organe de réglage à thyristors 14, de telle sorte que la vitesse du train corresponde à la valeur de consigne. Pour éviter l'endommagement des machines lors d'un arrêt d'urgence, ou en cas d'incident, par suite d'une variation trop rapide de la valeur de consigne, le dispositif de régulation est pourvu de deux amplificateurs 15a et 15b (fig. 5). Ceux-ci limitent les courants de décélération et d'accélération. La valeur instantanée pour la limitation de courant est prélevée sous forme d'une chute de tension aux pôles de commutation de la génératrice. Les valeurs limites peuvent être ajustées séparément.

Les «autopilotes» arrêtent les trains automatiquement aux gares en ramenant les valeurs de consigne à zéro. L'excitation et l'excitation inverse des génératrices sont alors séparées, les enroulements servant à la suppression de la tension de rémanence enclenchés et les enroulements de champ des moteurs déclenchés. Le serrage des freins à ressorts se fait avec un petit retard.

Fonctionnement du système de commande manuelle

Pour les cas de perturbation et les manœuvres, chaque train-Minirail possède un dispositif de commande manuelle indépendant de la commande automatique. Celui-ci est enclenché à l'aide du sélecteur du genre de service 10 (fig. 5) permettant de fixer également le sens de la marche, et est manœuvré au moyen du bouton d'un potentiomètre. Le potentiomètre possède en plus du cran zéro un second cran. Si on le ramène de la position zéro au second cran d'arrêt, les freins à ressorts sont desserrés par l'intermédiaire de combinateurs à cames et l'équipement d'entraînement est enclenché comme dans le cas de la commande automatique. Comme le potentiomètre agit, par l'intermédiaire de l'organe de réglage à thyristor 14 du régulateur Veritron 12 (fig. 5), sur l'enroulement d'excitation de la dynamo, on peut ajuster par son bouton la vitesse de train désirée. Pour éviter l'apparition de courants d'accélération et de décélération trop élevés lorsqu'on tourne trop rapidement le potentiomètre, un intégrateur additionnel est couplé à l'organe de réglage. Un générateur de fonction rattrape l'aplatissement de la caractéristique de la génératrice dû à la saturation.

Pour arrêter le train, on ramène le bouton du potentiomètre au second cran, on fait marcher le train sur l'erre et on passe ensuite sur le cran zéro. Ceci entraîne le déclenchement des équipements de traction et le serrage des freins. Si on ramène le bouton au cran zéro pendant la marche à pleine vitesse, on obtient un freinage de secours. Pour la marche arrière, la valeur de consigne est conformément à la pratique limitée à la vitesse de manœuvre.

Comme le dispositif de commande de gâchettes du régulateur 13 possède un système de compensation de tension de réseau et que la valeur de consigne est stabilisée, la vitesse de marche n'est influencée que par la charge. Même, le passage aux points de séparation n'entraîne aucune variation de vitesse, et ceci malgré les sauts de tension qui peuvent atteindre une valeur égale à 10% de la tension nominale.

Résultats d'exploitation

Les trois installations de trains-Minirail pour l'exposition mondiale de Montréal ont été montées au cours de l'hiver rigoureux de 1966/1967. Comme le dépôt ne pouvait recevoir que deux trains, les trains montés devaient rester dehors tout l'hiver. Lors de la mise en service en mars 1967, la température était de −22 °C et de l'eau condensée gelée rendait le fonctionnement des appareils de commande difficile. Pour obvier à cet inconvénient, les armoires d'appareillage de couplage furent chauffées électriquement l'hiver 1967/1968.

Pour la mise en service, on réglait les trains provisoirement et on les envoyait sur la ligne en marche automatique. Tandis que l'on procédait aux réglages fins dans une gare, on faisait rouler les trains

sur la ligne et passer dans toutes les autres gares. Ainsi, les trains et les gares restaient sans surveillants; ce qui a permis d'économiser, lors de la mise en service, de grosses sommes sur les dépenses de salaires.

A l'exposition internationale, les trois installations de trains-Minirail se sont avérées très attrayantes. Pendant la période d'exposition de six mois de 1967, on a dénombré 17 millions de personnes ayant emprunté les trains-Minirail. Ce nombre témoigne de façon claire non seulement de la valeur du système de transport Minirail, mais encore de la qualité des équipements électriques d'entraînement et de commande livrés par la Société Brown Boveri.

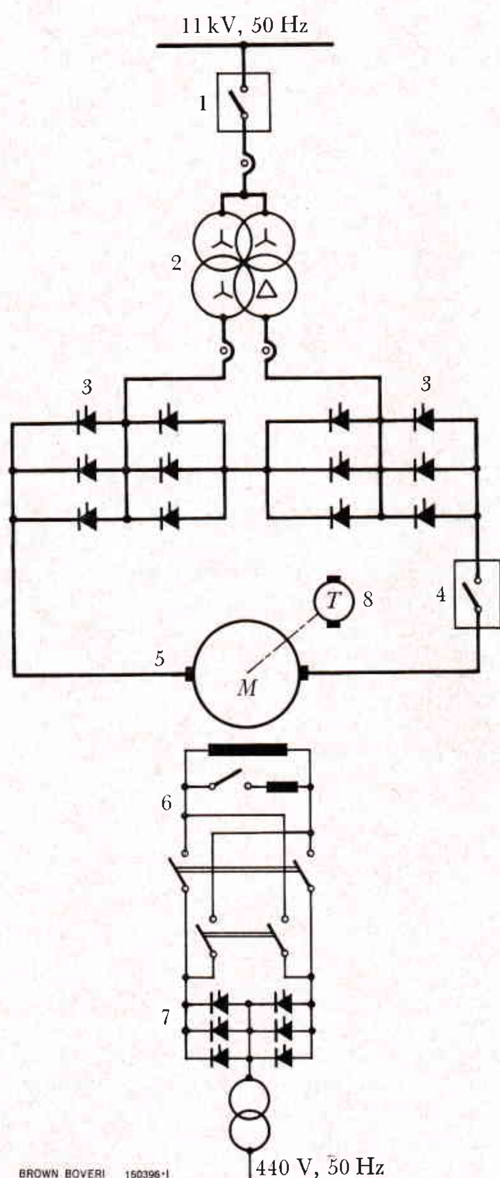
(A. G.)

ERWIN ALZINGER et
FRIDOLIN KRONIG

EN BREF

Equipement d'entraînement de 2200 kW à courant continu pour un laminoir à tubes en Ecosse

621.313.2:621.771.28



La Stewarts & Lloyds Limited, à Bellshill (Ecosse), a décidé, en août 1968, de moderniser son laminoir à étirer et réduire les tubes et d'élargir la gamme des tubes pouvant être fabriqués. A cet effet, elle nous a commandé un nouvel équipement d'entraînement dans lequel l'induit du moteur aussi bien que le circuit d'excitation sont alimentés par l'intermédiaire de thyristors de notre type le plus récent groupés pour former des convertisseurs statiques commandés, dénommés Thyserts.

Les caractéristiques techniques du moteur et du convertisseur sont les suivantes:

Moteur:

Puissance nominale	2200 kW
Vitesse de rotation	0 à 300/625 tr/min
Tension nominale	625 V
Courant nominal	3750 A
Courant maximal	7500 A

Convertisseur:

Nombre de thyristors alimentant l'induit	216
Nombre de Thyserts correspondants	6

Fig. 1. – Schéma de principe des circuits d'alimentation

1 = disjoncteur à haute tension
2 = transformateur
courants 168/3160 A
tensions 11 kV/310 V
3 = redresseur comprenant 6 × 18 thyristors
4 = disjoncteur rapide à courant continu
5 = moteur de 2200 kW, 625 V, 3750 A
6 = contacteur-inverseur du circuit d'excitation
7 = redresseur comprenant 6 thyristors
8 = dynamo tachymétrique

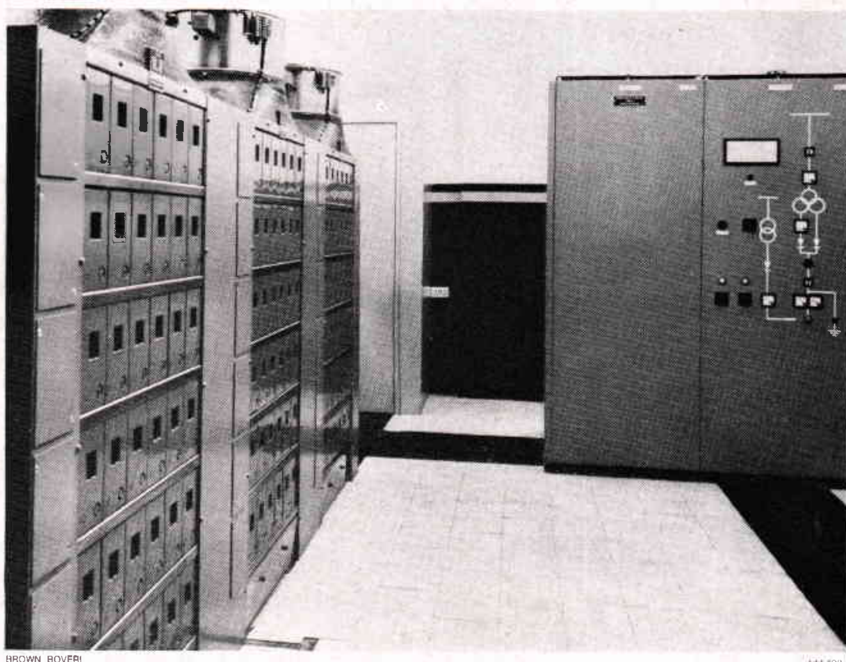


Fig. 2. – Thyserts alimentant l'induit du moteur avec armoires de l'appareillage de commande et de régulation à l'arrière-plan

Nombre de thyristors d'excitation	6
Nombre de Thyserts correspondants	1

Thyristors:

Tension inverse de pointe maximale	1100 V
Courant permanent maximal	150 A

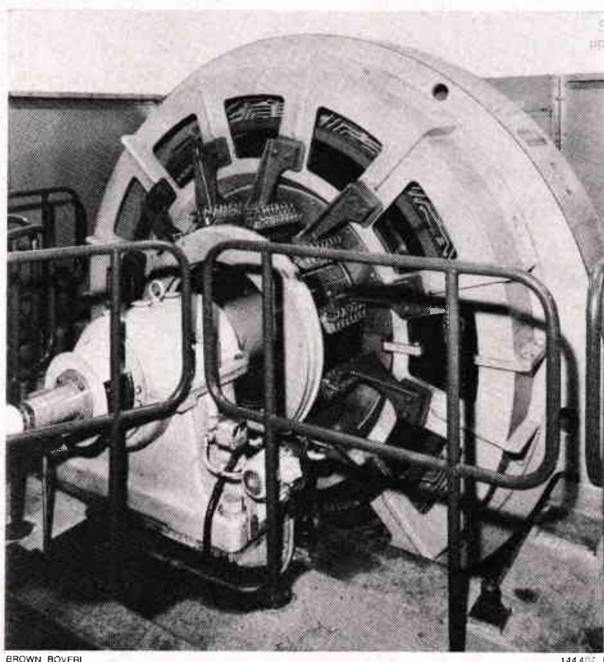


Fig. 3. – Moteur à courant continu de 2200 kW, 0 à 300/625 tr/min, avec enroulement de compensation

Les convertisseurs sont construits pour une seule direction du courant.

L'avance par petits à-coups est possible dans les deux sens de rotation, par inversion du courant d'excitation. Pour le freinage, le convertisseur fonctionne en régime d'onduleur.

Comme le montre le schéma de la figure 1, on a choisi, pour l'alimentation de l'induit, le couplage en série de deux ponts triphasés. Chaque bras du pont comprend 18 thyristors en parallèle. Le montage adopté a permis d'éviter la réduction de la tension de service qui est nécessaire avec le couplage direct en série de plusieurs thyristors.

Un Thysert (fig. 2) constitue un élément normalisé de la technique électronique Brown Boveri pour courants forts, pouvant être équipé de diverses manières pour obtenir un grand nombre de variantes. Les thyristors eux-mêmes sont montés dans des tiroirs, éléments de base contenant, dans leur exécution normale, un thyristor avec radiateur, le circuit *RC* associé, les organes du circuit de commande, ainsi qu'un fusible spécial pour semi-conducteur avec indicateur de fusion.

L'installation qui nous occupe comprend six Thyserts à 36 tiroirs alimentant l'induit du moteur et un Thysert à six tiroirs alimentant le circuit d'excitation. Ce dernier est à refroidissement naturel tandis que les premiers sont refroidis par ventilation forcée.

Le moteur à courant continu (fig. 3) est une machine dont les paliers reposent sur deux chaises. Chacun des paliers comprend une bague de graissage et

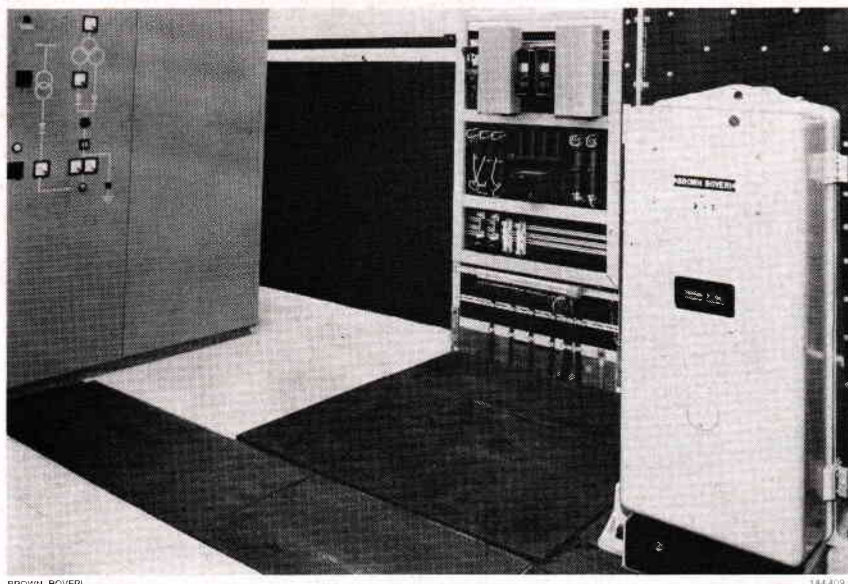

BROWN BOVERI 144409 I

Fig. 4. – Disjoncteur rapide à courant continu inséré dans le circuit de l'induit

une pompe à huile. Le moteur est fixé sur une plaque de base montée elle-même sur le massif de fondation existant. Il est muni de pôles auxiliaires et d'un enroulement de compensation. Le stator est en deux parties. L'air de refroidissement est aspiré à travers la plaque de base et est refoulé dans le local du côté du collecteur.

Le transformateur alimentant le redresseur est un transformateur d'intérieur à refroidissement naturel. Il est équipé de deux enroulements alimentant respectivement les deux ponts triphasés.

Le démarrage et la mise en vitesse du moteur sont commandés d'un pupitre de commande. Le disjoncteur à courant continu n'est enclenché qu'au moment où tous les services auxiliaires sont préparés et où l'appareil d'ajustement de la vitesse est mis dans la position désirée. Un selsyn raccordé au potentiomètre de démarrage permet de fixer d'avance la vitesse sur le pupitre.

Pour l'arrêt normal, le potentiomètre de démarrage est ramené à sa position de repos. Pour le freinage d'urgence, le courant d'excitation est inversé et les impulsions d'amorçage des thyristors alimentant l'induit sont déplacées de manière que le redresseur fonctionne en onduleur.

Tout le dispositif de commande est agencé de manière qu'en cas de besoin, le moteur s'arrête automatiquement. Dans les autres cas, la machine s'arrête après un signal d'avertissement, au bout d'un délai de durée ajustable.

L'appareillage de commande et de régulation est logé dans trois armoires métalliques (fig. 4) et tous les câbles sont raccordés au bas de ces armoires. Tous les dérangements pouvant survenir sont annoncés par un signal optique et un signal acoustique.

La construction de cet équipement complet a duré huit mois seulement. Grâce aux travaux préparatoires complets et minutieux effectués par l'utilisateur, le montage de l'installation complète et sa mise en service ont pu se faire en quinze jours. Depuis, l'installation fonctionne et donne entière satisfaction.

(P. H.) MADAN KAPOOR

Nouvelle diode de puissance au silicium, type DSA 400

621.382.2:546.28

La Société Brown Boveri, de Baden, a mis au point une nouvelle diode de grande puissance, type DSA 400, pouvant débiter 400 A, qui est maintenant fabriquée en série.

Cette nouvelle diode (fig. 1), dans son exécution avec embase plate et partie supérieure en céramique, est construite selon la technique utilisée jusqu'ici et qui a fait ses preuves, avec jonction formée par diffusion. L'emploi généralisé du brasage fort pour tous les joints avec le boîtier rend la diode apte à supporter une charge très variable.

Au lieu de se faire par l'intermédiaire d'une tresse sertie, le raccordement de la cathode se fait directement sur une tige cylindrique. L'utilisateur peut donc choisir librement la tresse de connexion qui répond à ses besoins.

Comme les caractéristiques données ci-après le montrent, la nouvelle diode satisfait simultanément aux deux exigences: laisser passer de forts courants de charge et supporter de hautes tensions inverses. La valeur efficace maximale admissible du courant direct s'élève à 780 A, pour une température du boîtier de 90 °C. La valeur limite du courant de pointe transitoire (valeur de crête d'une alternance sinusoïdale à 50 Hz, pour une température de la jonction de 140 °C) est de 10800 A. La température maximale admissible de la jonction est de 160 °C.

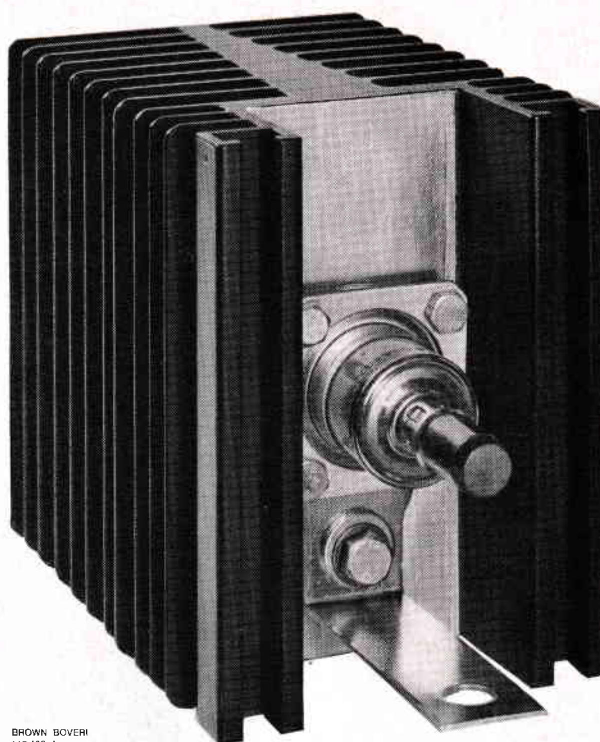
L'utilisateur appréciera certainement le fait que cette nouvelle diode est du type à «avalanche contrôlée». La valeur admissible des pertes est du même ordre de grandeur pour le sens direct et pour le sens inverse. La valeur typique de la puissance admissible en régime de courant de choc non périodique, dans le sens inverse, est égale à 100 kW. Cette valeur est valable pour une température de la jonction de 25 °C et une durée du courant de pointe de 20 µs.

La nouvelle diode DSA 400 peut être livrée pour 14 classes différentes de tension. Les diodes correspondant aux valeurs de crête de la tension inverse répétitive maximale de 1100 V, 1400 V, 1700 V, 2000 V, 2300 V, 2600 V, 2900 V, 3200 V, 3800 V, 4400 V et



Fig. 1. – Diode de grande puissance au silicium, type DSA 400

Fig. 2. – Diode de grande puissance au silicium, type DSA 400, avec radiateur K 46



5000 V sont vendues sur le marché comme des diodes du type à «avalanche» résistant aux tensions de choc. Celles qui correspondent aux valeurs de crête de la tension inverse répétitive maximale de 350 V, 500 V et 800 V ne sont pas du type à avalanche.

Il a été créé pour ces diodes un radiateur, type K 46, en alliage d'aluminium (fig. 2). Ce radiateur a, pour une puissance dissipée de 200 W, une résistance thermique de 0,35 °C/W lorsqu'il est refroidi naturellement. Avec ventilation forcée (vitesse de l'air 6 m/s), cette résistance se réduit à 0,12 °C/W. Les dimensions de ce radiateur s'élèvent à 125 × 183 × 160 mm; son poids est de 3,2 kg.

(P. H.) HANS GILGEN

Bobines d'inductance à haute tension pour le réseau américain à 765 kV

621.318.43

On connaît les diverses raisons pour lesquelles il est devenu nécessaire de transporter des quantités toujours plus considérables d'énergie électrique à des distances toujours plus grandes. Si l'on décide d'effectuer le transport d'énergie en courant triphasé, on se trouve en face de deux problèmes particulièrement importants: la stabilité des lignes et les surtensions pouvant apparaître sur ces lignes lorsqu'elles fonctionnent à vide ou que la charge est brusquement supprimée. Des considérations techniques et économiques conduisent très souvent à appliquer, pour résoudre ces problèmes, la solution consistant à compenser, au moins partiellement, la capacité des lignes au moyen de bobines d'inductance raccordées directement aux conducteurs des lignes à haute tension [1]. On réussit ainsi à compenser la puissance de charge des lignes et à réduire notablement les surtensions auxquelles nous avons fait allusion.

L'American Electric Power System (AEP) est en train de construire aux Etats-Unis une ligne traversant des parties de cinq états et ayant une longueur totale d'environ 2000 km. Cette ligne est établie pour être parcourue par un courant de 3000 A et pour la tension nominale de 765 kV. La compensation sera réalisée à l'aide de bobines d'inductance capable de produire une puissance réactive totale d'environ 3500 Mvar [2, 3]. Nous avons reçu, au printemps 1967, la commande de 21 bobines d'inductance monophasées devant être établies pour la tension étoilée de $765:\sqrt{3}$ kV et pour la puissance de 100 Mvar (300:3), ainsi que de 3 bobines pour la même tension, mais pour 50 Mvar (150:3). Ces bobines doivent être installées dans

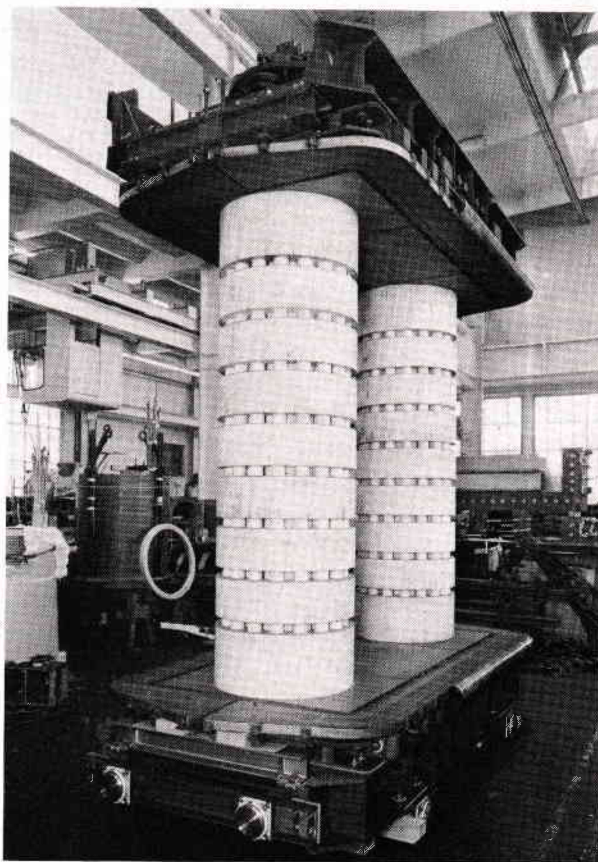


Fig. 1. – Circuit magnétique à deux colonnes d'une bobine d'inductance de 110 Mvar, pour ligne à 735 kV

Année de construction: 1965.

quatre des onze centrales réparties le long de la ligne. A propos de cette importante commande, nous pouvons signaler que les bobines d'inductance du même genre que nous avons déjà livrées pour le réseau canadien à 735 et à 500 kV, ainsi que pour le réseau nord-américain à 500 kV fonctionnent normalement et que leur comportement est tout à fait satisfaisant [4].

Il existe différentes manières de construire les bobines d'inductance à haute tension. Toutes nos bobines sont construites avec un noyau entouré par l'enroulement. Dans sa partie médiane, le noyau, qui est composé de tôles disposées radialement, est interrompu par un certain nombre d'entrefers. Les noyaux à tôles radiales sont utilisés avec succès depuis plus de vingt ans dans la construction des transformateurs de puissance et, aujourd'hui encore, pour certains transformateurs spéciaux, destinés aux locomotives par exemple. L'avantage de cette construction réside en particulier dans le fait que l'enroulement ressemble beaucoup à celui des transformateurs.

La première bobine d'inductance que nous avons construite était destinée au réseau à 735 kV de la Commission hydroélectrique de Québec (Canada) et a été livrée et mise en service en 1965 [5]. La puissance de cette bobine monophasée s'élevait à 110 Mvar. En raison des valeurs élevées des tensions d'essai imposées à l'époque et de la nécessité de transporter cette bobine par chemin de fer, c'est une construction à deux colonnes qui fut choisie (fig. 1). Mais depuis lors, diverses circonstances ont permis de réduire sensiblement le niveau d'isolement des réseaux à haute tension sans porter atteinte à leur sécurité d'exploitation. C'est pourquoi il a été possible, pour les bobines qui nous occupent et bien qu'elles doivent être transportées par chemin de fer, d'adopter la construction à une seule colonne (fig. 2). Cette construction est moins encombrante et est aussi plus favorable, tant au point de vue des pertes que du prix (voir tableau ci-contre). Si, en appliquant la loi d'accroissement des pertes des transformateurs en fonction de la puissance, on rapporte les pertes de 214 kW de la bobine de 100 Mvar à une seule colonne à la puissance de 110 Mvar, la valeur des pertes passe à 232 kW. On constate donc que les pertes obtenues avec la construction à une colonne sont inférieures de 28% (voir tableau) à celles que l'on a avec la construction à deux colonnes. On obtient le même résultat si l'on compare les pertes par unité de puissance réactive des deux exécutions. Trois facteurs différents contribuent à cette importante réduction des pertes:

les valeurs réduites des tensions d'essai,
la technique améliorée,
la construction plus favorable.

Jusqu'à fin 1968, huit des 24 bobines commandées ont subi avec succès les essais prescrits en usine et ont

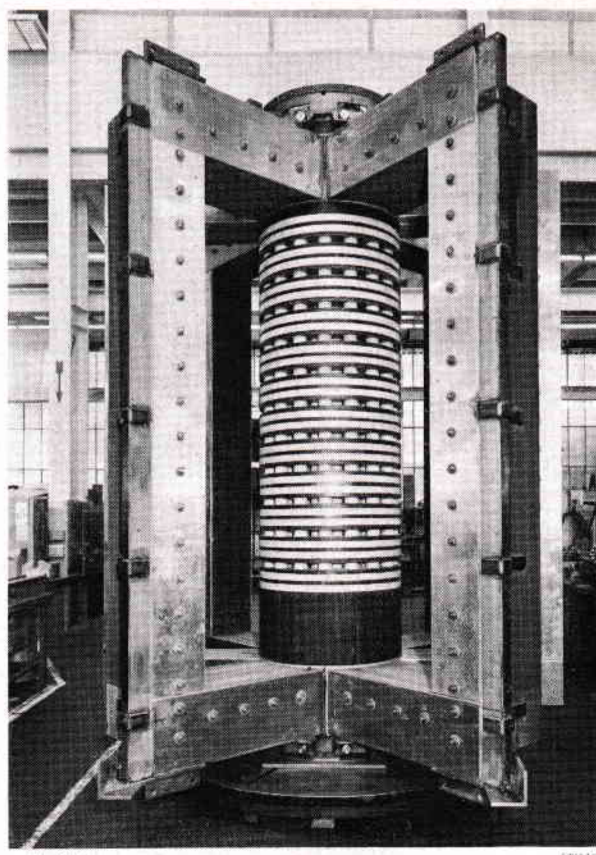


Fig. 2. – Circuit magnétique à une seule colonne d'une bobine d'inductance de 100 Mvar, pour ligne à 765 kV

Année de construction: 1968.

Comparaison des caractéristiques de deux bobines d'inductance, construites pour deux niveaux d'isolement (Basic Insulation Level) différents, l'une à une colonne, l'autre à deux colonnes

	Exécution à 1 col.	Exécution à 2 col.
Puissance en Mvar	300:3	330:3
Fréquence en Hz	60	60
Tension nominale en kV	$765:\sqrt{3}$	$735:\sqrt{3}$
Nombre de phases	1	1
Tensions d'essai:		
onde de choc pleine (1,5/40), en kV	1800	2150
onde de choc coupée sur la queue, en kV	2070	2475
tension induite de remplacement, valeur de crête en kV	1490	–
Pertes à la tension nominale, en kW	214	322
Pertes par unité de puissance réactive, en kW/Mvar	2,14	2,93
Poids (sans radiateurs), en t	89	107
Volume de la cuve, en m³	36,6	44,8
Année de livraison	1968	1965

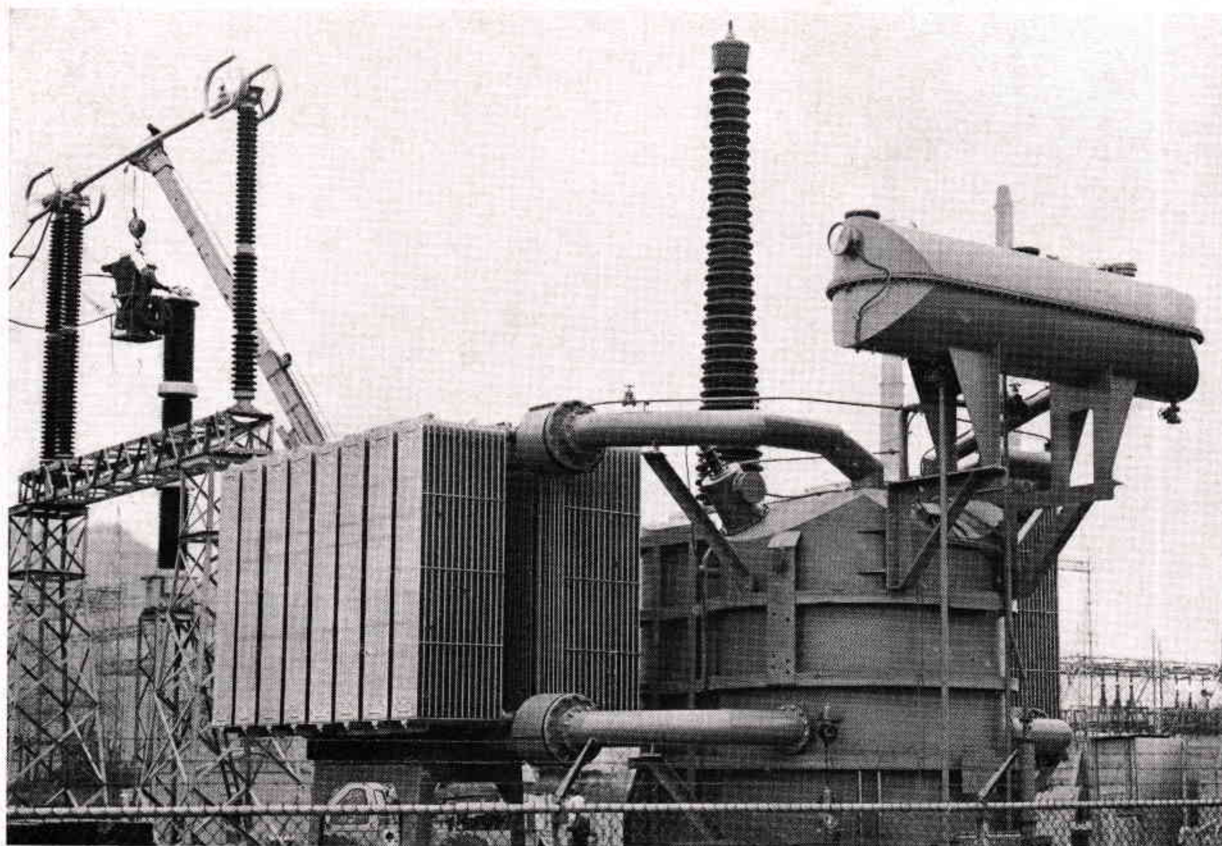


Fig. 3. – Bobine d'inductance de 100 Mvar raccordée à une ligne à 765 kV de l'American Electric Power System

Les travaux de montage de cette bobine, la première qui ait été livrée, sont presque terminés.

été livrées. La première d'entre elles est installée et fonctionne en service d'essai depuis le milieu de décembre [3]. On la voit sur la figure 3, au premier plan, dans le poste auquel elle était destinée, peu avant la fin des travaux de montage.

(P.H) FRIEDRICH HUBER

Bibliographie

[1] W. Frey: Considérations sur le choix de la tension de service de longues lignes transmettant de grandes puissances. *Rev. Brown Boveri*, t. 5 (1964), n° 1/2, p. 5 à 9.

[2] AEP to construct first 765 kV transmission grid in the United States. *IEEE Spectrum*, vol. 3 (1966), n° 3, p. 147 à 148.

[3] A. Hauspurg: 765 kV test facility nears completion. *Elect. Wld*, vol. 170 (1968), n° 2, p. 94 à 96.

[4] F. Huber: Inductances pour 420 à 765 kV en construction et en service. *Rev. Brown Boveri*, t. 55 (1968), n° 4/5, p. 259 à 260.

[5] H. Wenger: La première bobine d'inductance Brown Boveri de 110 Mvar, pour $735/\sqrt{3}$ kV, 60 Hz, a subi les essais de réception avec succès. *Rev. Brown Boveri*, t. 52 (1965), n° 4, p. 341 à 342.



Editeur: Société Anonyme Brown, Boveri & Cie, Baden (Suisse). Imprimé par Kreis & Cie S.A. à Bâle
Distributeur pour la France: Cie Electro-Mécanique, 12, rue Portalis, Paris (8e)